

Patrick Pilz

**Künstliche Hallerzeugung und ihre neueste
Technologie der Faltungshall mit besonderem
Blick auf Low-Budget-Lösungen**

– Bachelorarbeit –

Hochschule Mittweida

University of Applied Sciences (FH)

Berlin – 2010

Patrick Pilz

**Künstliche Hallerzeugung und ihre neueste
Technologie der Faltungshall mit besonderem
Blick auf Low-Budget-Lösungen**

– eingereicht als Bachelorarbeit –

Hochschule Mittweida

University of Applied Sciences (FH)

Erstprüfer

Prof. Dr. Michael Hösel

Zweitprüfer

Thomas Thiele

Berlin – 2010

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	4
Grundlagen der Akustik	5
Schallausbreitung in der Luft	5
Freies und diffuses Schallfeld	7
Schallreflexion	7
Schallbeugung	8
Schallabsorption	9
Aufbau des Schallfeldes	11
Direktschall	12
Erste Reflexionen	12
Nachhall	13
Frequenzabhängigkeit des Nachhalls	15
Hallradius	15
Geschichte der künstlichen Hallerzeugung	17
Warum künstlicher Nachhall	17
Hallraum	20
Worldizing	21
Mechanische Hallgeräte	22
Federhall	22
Hallplatte	24
Hallfolie	25
Elektronische Hallgeräte	26

Digitale Hallgeräte	27
Faltungshall	28
Grundlagen der Signalverarbeitung	29
Signale	29
Systemtheorie	29
LTI-Systeme in der Theorie und Praxis	31
Faltung	31
Impuls und Impulsantwort	32
Fourier Transformation	32
Anregungssignale für die Messung der Impulsantwort	34
Vorüberlegungen zur Erstellung der Impulsantwort	37
Software	37
Anregungssignal	37
Wiedergabesystem	38
Mikrofonierung	39
Aufnahmesystem	40
Korrektur des Frequenzgangs	40
Messung	42
Dokumentation	42
Bearbeitung der Impulsantwort	43
Sinn und Auswirkung von Faltungshall	44
Praxis	47
Technik	47

Vergleich Realität und Impulsantwort	47
Mobiles System	48
Vergleich von Sweep und Impuls durch Luftballon	49
Klangcharakteristik von Geräten einfangen	49
Auswertung	50
Sonstige Anwendungen für Faltungshall	52
Auralisation	52
Sound Design	52
Simulation von Effektgeräten	54
Nicht-Lineare Systeme	55
Fazit	57
Auswahl an Links zu kostenlosen Impulsantworten	58
Quellenverzeichnis	59
Abbildungsverzeichnis	61
Inhalt der CD	62
Selbstständigkeitserklärung	63

1. Einleitung

Mit dieser Arbeit möchte ich eine Einführung in die Hallerzeugung durch Faltung liefern, welche durch die steigende Rechenleistung in den letzten Jahren Einzug in die (Heim-)Tonstudios hielt. Dabei möchte ich besonders auf günstige Lösungen eingehen.

Um Grundlagen zu schaffen, gebe ich erstmal eine kurze Einführung in die Grundlagen der Akustik, an die sich ein Abriss der Geschichte der Hallerzeugung anschließt. Im weiteren Verlauf werde ich die grundlegenden Prinzipien der Hallerzeugung durch Faltung und die Erstellung eigener Impulsantworten erläutern. Anschließend möchte ich mit einigen Versuchen die theoretischen Erkenntnisse, die ich bei der Erstellung dieser Arbeit erfahren habe, in der Praxis überprüfen.

2. Grundlagen der Akustik

2.1. Schallausbreitung in der Luft

Wenn eine Schallquelle erklingt, versetzt diese die Teilchen des sie umgebenden Mediums, z.B. Luft, in Schwingungen, welche auf die benachbarten Teilchen übertragen werden und sich somit wellenförmig als Schallwellen im Medium ausbreiten. Dabei bewegen sich die Teilchen um ihre Ruhelage herum und erzeugen somit geringfügige Druckschwankungen, die dem stationären Luftdruck überlagert sind. Diese Druckschwankungen werden Schalldruck genannt und werden in Pascal angegeben. Durch Messungen am Menschen konnte man einen Bezugswert p_0 festlegen, der den minimalen Schalldruck beschreibt, den ein durchschnittlich hörender Mensch bei 1000 Hz wahrnehmen kann. Dieser Wert liegt bei $2 \cdot 10^{-5}$ Pa und der Wert für die Schmerzgrenze liegt bei etwa $1,5 \cdot 10^2$ Pa.¹ Zum Vergleich: der atmosphärische Luftdruck beträgt etwa 1000 Hektopascal. Da man mit diesen Werten aber nur schlecht arbeiten kann, benutzt man zur Kennzeichnung des Schalldrucks den absoluten Schalldruckpegel L_p oder kurz Schallpegel, der das 20fache logarithmierte Verhältnis zum Wert p_0 ist und die Maßeinheit dB hat (DIN 5493).² Dieser entspricht auch eher dem menschlichen Lautstärkeempfinden. Die Werte für die Hörschwelle und die Schmerzgrenze bei 1000 Hz liegen dabei bei 4 dB beziehungsweise 130 dB.

$$L_p = 20 \lg \frac{p}{p_0}$$

L_p absoluter Schalldruckpegel in dB

p Schalldruck in Pa

p_0 Bezugsschalldruck $2 \cdot 10^{-5}$ Pa

Die Geschwindigkeit, mit der die Teilchen sich um ihre Ruhelage bewegen, wird Schallschnelle genannt. Im Nahfeld einer Schallquelle verhalten sich Schalldruck und Schallschnelle in Abhängigkeit von

¹ vgl. Dickreiter 1997, S. 6

² vgl. Dickreiter 1997, S. 8

der Frequenz nicht proportional und sind in ihrer Phase verschoben. Die Schallschnelle steigt erheblich schneller an als der Schalldruck. Dies macht sich z.B. als Nahbesprechungseffekt bei Mikrofonaufnahmen bemerkbar und ist auch bei der Konstruktion von Absorbern von Relevanz. Erst im Fernfeld befinden sich Schalldruck und Schallschnelle in Phase und sind proportional zueinander.³

Die Anzahl der Druckschwankungen bzw. Schwingungen pro Sekunde ergibt die Frequenz f mit der Einheit Hertz (Hz). Der für den gesunden, durchschnittlichen Menschen hörbare Bereich liegt bei 20 Hz - 20 kHz, nimmt aber mit zunehmendem Alter ab. Die Länge einer Schwingung wird als Wellenlänge λ bezeichnet und beträgt für 20 Hz etwa 17 m und für 20 kHz etwa 1,7 cm.

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

λ Wellenlänge in Metern
 c Schallgeschwindigkeit
 f Frequenz

Die Geschwindigkeit mit der sich die Schallwellen im Medium ausbreiten, wird Schallgeschwindigkeit c genannt und ist Temperaturabhängig. Andere Einflüsse wie Luftdruck und Luftfeuchtigkeit sind vernachlässigbar. Für das Medium Luft beträgt sie bei 20° C etwa 344 m/s und nimmt mit jedem Grad Temperaturanstieg um etwa 0,6 m/s zu.⁴ Da es sich bei Luft um ein nicht dispersives Medium handelt, ist sie nicht frequenzabhängig. Aufgrund der relativ langsamen Schallgeschwindigkeit beträgt die Verzögerung von einer Schallquelle zu einem Empfänger in 34 m Entfernung ca. 1/10 Sekunde, was ungefähr einer 16tel Note bei 152 bpm entspricht.⁵

³ vgl. Dickreiter 1997, S. 7

⁴ vgl. Dickreiter 1997, S. 3

⁵ vgl. Meyer 2004, S. 15

2.2. Freies und diffuses Schallfeld

Die sich im Medium ausbreitenden Schallwellen werden als Schallfeld bezeichnet. Wenn sie sich ungehindert ausbreiten können und ohne Umwege den Empfänger erreichen (Direktschall), handelt es sich um ein freies Schallfeld. Dieses existiert aber nur annähernd in der Natur über einer schneebedeckten Fläche oder künstlich in sogenannten schalltoten Räumen.⁶ Im Normalfall wird die Ausbreitung der Schallwellen aber durch Hindernisse gestört, an denen die Schallwellen in Abhängigkeit von der Frequenz reflektiert, gebeugt, absorbiert oder durchgelassen werden.⁷ Das Schallfeld besteht jetzt nicht mehr nur aus Direktschall sondern auch aus diffusem Schall und enthält wichtige Informationen über die Raumgröße und die Materialien der Begrenzungsflächen.

2.2.1. Schallreflexion

Um eine Schallwelle zu reflektieren, muss das Hindernis ein Vielfaches der Größe der Schallwelle betragen. Erst bei einer etwa fünf mal so großen Ausdehnung wird die Schallwelle zum größten Teil reflektiert und es entsteht ein Schallschatten hinter dem Hindernis.⁸ Treffen diese Bedingungen zu, gelten die Reflexionsgesetze der Optik, d.h. im einfachsten Fall beträgt der Einfallswinkel gleich dem Ausfallswinkel, was aber nur für ebene Flächen gilt. Dieser Aspekt ist wichtig bei der raumakustischen Planung von Räumen, wo parallele Wände möglichst vermieden werden, da durch sie leicht stehende Wellen oder Flatterechos entstehen können. Ist der Wandabstand gleich der halben Wellenlänge oder einem ganzzahligen Vielfachen davon, wird die entsprechende Frequenz und ihre harmonischen Obertöne bei einer vollständigen Reflexion je nach Position im Raum entweder ausgelöscht oder verdoppelt. Bei impulsartigem Schall entstehen dabei Flatterechos, wobei bei großen Wandabständen einzelne Echos wahrnehmbar sind und bei kleineren Wandabständen kommt es zu einem Klangecho, einer Art Nachhall in einer bestimmten Tonhöhe. Diesen Effekt kann man

⁶ vgl. Dickreiter 1997, S. 11

⁷ vgl. <http://www.sengpielaudio.com/AllgemeineSchallausbreitung.pdf>

⁸ vgl. Dickreiter 1997, S. 16

häufig in Badezimmern hören, wenn man kräftig in die Hände klatsch.

Bei der Reflexion an nach innen gekrümmten (konkaven) Flächen muss man vier Fälle unterscheiden.

1. Fall: Ist der Abstand von Schallquelle zu reflektierender Fläche größer als der halbe Krümmungsradius aber kleiner als der Gesamtkrümmungsradius, sammelt sich der Schall außerhalb des Kreisradius.
2. Fall: Ist der Abstand von Schallquelle zu reflektierender Fläche gleich dem halben Krümmungsradius, verlaufen die Schallwellen nach der Reflexion parallel.
3. Fall: Ist der Abstand zwischen Schallquelle und reflektierender Fläche kleiner als der halbe Krümmungsradius, werden die Schallwellen zerstreut.
4. Fall: Ist der Abstand von Schallquelle zu Reflektierender Fläche größer als der Krümmungsradius, werden die Schallwellen noch stärker zerstreut als bei Fall 3.

Nach außen gekrümmte (konvexe) Flächen haben immer eine schallzerstreuende Wirkung. Dabei gilt, dass eine schallzerstreuende Wirkung die Diffusität erhöht und somit erwünscht ist, während eine schallbündelnde Wirkung in den meisten Fällen nicht gewünscht ist, da die Gefahr der Hervorhebung von gewissen Frequenzen an einzelnen Stellen im Raum besteht.⁹

2.2.2. Schallbeugung

Ist das Hindernis so groß wie die Wellenlänge oder kleiner, wird die Schallwelle nicht reflektiert, sondern um das Hindernis herum gebeugt und es existiert praktisch nicht. Da die Wellenlängen im hörbaren Bereich von etwa 2 cm bis 20 m reichen,¹⁰ ist der Klang hinter einem Hindernis dumpf, weil die höheren und somit

⁹ vgl. Dickreiter 1997, S. 11ff.

¹⁰ vgl. Dickreiter 1997, S. 15

kurzwelligen Frequenzen reflektiert und die tiefen, langwelligen gebeugt werden.

2.2.3. Schallabsorption

Bei der Absorption wird dem Schall durch Umwandlung in Wärme Energie entzogen (Schalldissipation). Dies passiert schon während der Schallausbreitung in der Luft, ist aber erst ab Frequenzen von etwa 5 kHz bemerkbar und nimmt mit steigender Frequenz zu.¹¹ Wesentlich größer ist der Energieverlust aber beim Auftreffen der Schallwellen auf ein Hindernis. Verschiedenen Materialien haben dabei ein unterschiedliches Vermögen den Schall zu absorbieren. Dieses Vermögen wird mit dem Absorptionsgrad α dargestellt, der die Werte 0 (totale Reflexion) bis 1 (totale Absorption) annehmen kann und frequenzabhängig ist. Ein Vorhang hat beispielsweise bei 125 Hz einen Absorptionsgrad von 0,05, welcher mit steigender Frequenz größer wird, sodass der Wert bei 4 kHz bei 0,5 liegt.¹² Außerdem wird der Absorptionsgrad noch durch die Anordnung der Materialien wie Wandabstand, Abdeckung usw. beeinflusst. In der Praxis liegen die Werte bei 0,02 bis 0,45.¹³

Um in einem Raum einen gleichmäßigen Ausklang des Frequenzspektrums zu erhalten und keine Frequenzen verstärkt oder ausgelöscht werden, muss man meistens mit Absorbern nachhelfen. Diese werden in Höhen-, Mitten- und Tiefenabsorbern unterteilt, da es keine Absorber gibt, die den gesamten Frequenzbereich abdecken.

Höhenabsorber

Bei Höhenabsorbern handelt es sich um poröse Stoffe, in die Luft eindringen kann und dann bei Schwingungen in den Poren hin und her strömt. Die Schallenergie wird somit durch Reibung in Wärme umgewandelt (Schalldissipation). Schaum- und Faserstoffe, wie z.B

¹¹ vgl. Dickreiter 1997, S. 18

¹² vgl. Dickreiter 1997, S. 20

¹³ vgl. <http://www.sengpielaudio.com/AllgemeineSchallausbreitung.pdf>

Textilien, Filze, Mineralwolle, aber auch offenporige Steine haben diese Eigenschaft. Am wirksamsten sind sie, wenn die Schallschnelle ein Maximum erreicht hat, während sie in einem Schnellennullpunkt fast wirkungslos sind. Bei der Reflexion an einer Wand befindet sich die Schallschnelle in einem Minimum, erst mit dem Abstand von einer viertel Wellenlänge erreicht die Schallschnelle ein Maximum. Je dicker das Material ist, desto größer ist die Wirkung auch zu tieferen Frequenzen hin. Die Formel für die untere Grenzfrequenz ist:

$$f_u = \frac{8500}{d}$$

f_u untere Grenzfrequenz in Hz
 d Abstand Absorber zu Wand in cm

Ein einfacher Höhenabsorber wäre ein schwerer Vorhang, wie z.B. Molton, der für einen gleichmäßigeren Frequenzgang in Falten vor eine Wand aufgehangen wird, während die beliebten Eierpappen so gut wie keine Wirkung haben, da sie einfach zu dünn sind und meistens einfach nur auf die Wand geklebt werden und sich somit in einem Schnellenminimum befinden.¹⁴

Mittenabsorber

Wenn man Höhenabsorber mit gelochten oder geschlitzten Platten abdeckt, werden sie auch im mittleren Frequenzbereich um 500 Hz wirksam. Wenn der Hohlraum hinter der Platte nicht mit Faser- oder Schaumstoff ausgekleidet ist, sondern nur mit Luft, spricht man von einem Helmholtz-Resonator, der aber nur relativ schmalbandig arbeitet. Die Luft in den Löchern und das dahinter liegende Luftvolumen bilden ein akustisches Masse-Feder-System. Durch ändern der Lochtiefe, des Lochdurchmessers (=Masse) und dem dahinter liegendem Volumen (=Federsteifigkeit), kann man die Resonanzfrequenz, an der der Absorber am effektivsten arbeitet, bestimmen.¹⁵

¹⁴ vgl. Dickreiter 1997, S. 19f.

¹⁵ vgl. Dickreiter 1997, S. 21f.

Tiefenabsorber

Tiefenabsorber sind Platten die möglichst luftdicht auf einen Rahmen vor einer Wand befestigt werden. Um die Wirkung zu erhöhen, wird der Hohlraum zwischen Wand und Platte meist noch mit Faserstoffen gefüllt. Treffen nun die energiereichen tiefen Frequenzen auf die Platte, beginnt diese zu schwingen. Die Schwingungen werden aber durch die federnde Konstruktion und durch innere Reibung gedämpft und somit wird ihnen Energie entzogen. Dabei gilt, dass je mehr Gewicht die Platte pro Quadratmeter hat und je weiter sie von der Wand entfernt ist, desto tiefer ist die Resonanzfrequenz.¹⁶

2.3. Aufbau des Schallfeldes

Ertönt eine Schallquelle in einem Raum kann man grob drei zeitliche Phasen unterscheiden. Die erste Phase ist der Direktschall, der den Empfänger ohne Umwege erreicht. Kurz danach treffen die ersten Reflexionen (Early Reflections) von Wänden, Decke usw. ein. Der Schall reflektiert im Raum nun immer weiter, wobei die Dichte der einzelnen Reflexionen immer größer wird. Diese letzte Phase wird als Nachhall bezeichnet. Die Gesamtheit des reflektierten Schalls wird als diffuses Schallfeld bezeichnet.

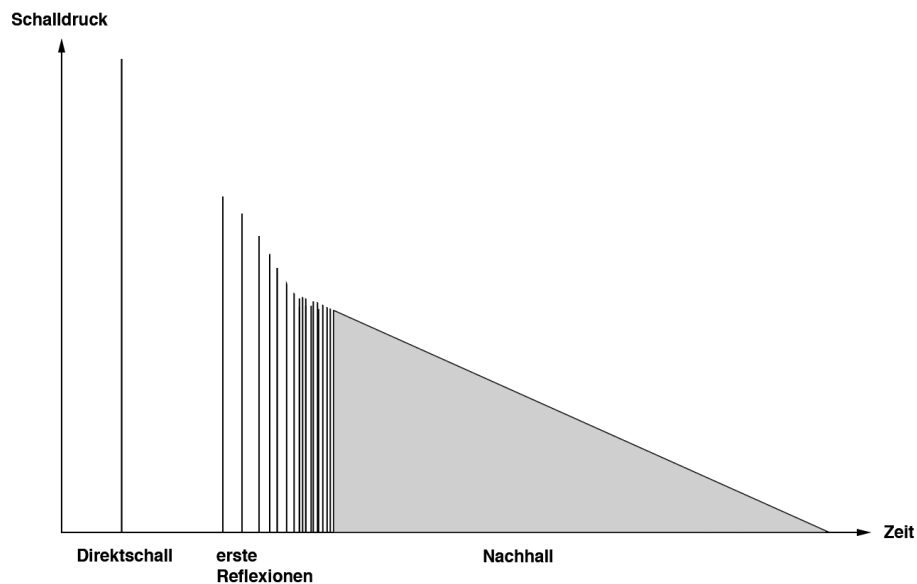


Abb. 1 Zeitlicher Aufbau des Schallfeldes

¹⁶ vgl. Dickreiter 1997, S. 22

2.3.1. Direktschall

Für eine gute Hörsamkeit in Räumen muss der Anteil des Direktschalls größer sein als der des Diffusschalls. Auch die ersten Reflexionen können dazu beitragen, wenn sie stark genug sind. Er ist auch für die Ortung der Schallquelle verantwortlich. Dabei gilt, dass wenn die ersten Reflexionen in einem Zeitrahmen von 10 - 30 ms nach dem Direktschall eintreffen, die Ortung nicht gestört wird und trotzdem nur eine Schallquelle zu hören ist. Der Schallpegel der Reflexionen kann sogar bis zu 10 dB über dem Direktschallpegel liegen. Erst bei einer Zeit von 50 ms werden, bei gleichem Pegel von Direktschall und Reflexionen, Echos wahrgenommen (Gesetz der ersten Wellenfront; Haas-Effekt). Dies ist z.B. bei der Beschallung von Räumen von Bedeutung, um auch weit entfernte Hörerplätze mit genug Schall zu versorgen.¹⁷

2.3.2. Erste Reflexionen

Die Wirkung der ersten Reflexionen auf das Hörereignis sind abhängig von der Verzögerungszeit zum Direktschall, der Intensität und der eintreffenden Richtung. Grundsätzlich erhöhen alle Reflexionen die Lautstärke des Direktschalls. Die Zeit zwischen dem Direktschall und dem Eintreffen der ersten Reflexionen heißt Anfangszeitlücke (ITDG = Initial Time Delay Gap). Sie ist für die empfundene Nähe der Schallquelle und die Raumgröße von Bedeutung. Bei einer nahen Schallquelle erreicht der Direktschall den Empfänger wesentlich eher als die ersten Reflexionen und der Direktschallpegel ist größer als der Nachhallpegel, während bei einer entfernten Schallquelle Direktschall und erste Reflexionen fast zeitgleich eintreffen und der Nachhallpegel im Vergleich zum Direktschall recht groß ist.¹⁸

Wenn die ersten Reflexionen 0,8 - 20 ms (0,3 - 7 m Schallumweg) nach dem Direktschall eintreffen, kann es zu ungewollten

¹⁷ vgl. <http://www.sengpielaudio.com/Haas-Effekt.pdf>

¹⁸ vgl. <http://www.sengpielaudio.com/AnfangszeitlueckeUndPredelay.pdf>

Klangfärbungen durch Phasenüberlagerungen bzw. -auslöschungen von Direktschall und Reflexionen kommen (Phasing). Bei einer Verzögerung von 20 - 50 ms wird die empfundene Raumgröße beschrieben und die Deutlichkeit von Sprache erhöht. Die Klarheit von Musik wird noch bis 80 ms verbessert. Für die räumliche Wirkung der ersten Reflexionen ist aber auch die Einfallrichtung von Bedeutung. Schall, der auf der Medianebene eintrifft, also von vorne, oben oder hinten, wird weniger wahrgenommen als seitlich einfallender und enthält somit auch weniger Rauminformationen. Ab 50 - 80 ms sind die Reflexionen als Echos wahrnehmbar, was stark von der Art der Schallquelle abhängig ist. Bei impulsartigem Schall sind Echos früher zu hören als bei langsamer Orchestermusik.¹⁹ Bei all diesen Zeitangaben ist aber zu beachten, dass sie nur gültig sind, wenn der Pegel der Reflexionen gleich dem des Direktschalls ist.²⁰

2.3.3. Nachhall

Unter Nachhall versteht man die Abnahme des diffusen Schallfelds nach Abschalten einer Schallquelle. Im Idealfall verteilt sich der Nachhall gleichmäßig im Raum, was er um so besser macht, je länger die Nachhallzeit ist. Nach dem Akustiker Sabine ist die Nachhallzeit als die Zeit definiert, in der der Schallpegel nach Abschalten einer Schallquelle um 60 dB fällt.²¹ Durch Versuche fand Sabine eine Formel zur Berechnung der Nachhallzeit, nach der die Nachhallzeit um so länger ist, je größer der Raum und je geringer der Absorptionsgrad der Begrenzungsflächen ist.

$$T = 0,163 \frac{V}{A}$$

T	Nachhallzeit in s
V	Raumvolumen in m ³
A	Absorptionsvermögen in m ²

Diese einfache Formel gilt vor allem für längere Nachhallzeiten und hat ein entscheidendes Problem: Wenn $A = 1$, also bei vollständiger

¹⁹ vgl. Dickreiter 1997, S. 28ff.

²⁰ vgl. <http://www.sengpielaudio.com/Echoschwelle.pdf>

²¹ vgl. Dickreiter 1997, S. 31

Absorption, wird die Nachhallzeit nicht 0. Daher wurde von Eyring eine genauere Formel entwickelt die auch für kürzere Nachhallzeiten gilt.

$$T = 0,163 \frac{V}{-S \ln(1 - \alpha_m)}$$

S Gesamtoberfläche des Raumes in m²
 α_m mittlerer Absorptionsgrad (dimensionslos)

Die gemessene oder errechnete Nachhallzeit stimmt aber nur selten mit der subjektiv empfundene Nachhallzeit überein. Diese als Nachhalldauer bezeichnete Zeit ist abhängig vom Schallpegel der Schallquelle, deren spektraler Zusammensetzung und dem Störschallpegel und ist als die Zeit definiert, in der der Nachhall hörbar ist. Der Schallpegel der Schallquelle hat dabei die größte Bedeutung. Je lauter die Schallquelle, desto halliger wirkt der Raum. Da es sich bei den Hörereignissen selten nur um impulshafte Geräusche, sondern meist um Musik- oder Sprachdarbietungen handelt, ist nur der Anfang des Nachhalls zu hören, weil der Rest von den nachfolgenden Signalen überdeckt wird. Diese für die Wahrnehmung der Akustik besonders bestimmende Zeitspanne wird Anfangsnachhall bezeichnet. Dabei wird der Pegelbereich der Nachhallkurve zwischen 0 und -10 dB (Early Decay Time), 0 und -15 dB (Initial Reverberation Time) oder zwischen 0 und -20 dB (Kürer und Kurze) ausgewertet.²²

Eine allgemeingültige optimale Nachhallzeit gibt es nicht, da diese stark von der Art der Darbietung, der Größe des Raumes, der Verteilung und Stärke der ersten Reflexionen, der Anfangsnachhallzeit und dem Frequenzgang der Nachhallzeit abhängig ist. Zum Beispiel wird für Sprache eine möglichst hohe Sprachverständlichkeit angestrebt, welche mit einer kürzeren Nachhallzeit erreicht wird. Um bei größeren Räumen aber auch entfernte Hörerplätze mit ausreichenden Schall zu versorgen, muss die

²² vgl. Dickreiter 1997, S. 33

Nachhallzeit ansteigen, da diese die Lautstärke erhöht. Außerdem ist sie auch vom Zeitgeschmack abhängig. Außerdem ist sie auch vom Zeitgeschmack abhängig. Nach der Einführung der digitalen Hallgeräte in den 80er Jahren wurden in der Popmusik gerne lange Nachhallzeiten benutzt, während heutzutage eher kleine Räume mit kurzen Nachhallzeiten bevorzugt werden.

2.3.4. Frequenzabhängigkeit des Nachhalls

In allen Räumen ist der Nachhall frequenzabhängig und somit klanglich verfärbt. Diese Färbungen sind entscheidend für die klanglichen Qualitäten eines Raumes. Allen Räumen sind dabei die schon durch die Luftabsorption gedämpften hohen Frequenzen gemeinsam, welche nie Nachhallzeiten von 3,1 s bei 5 kHz und 1,2 s bei 10 kHz überschreiten können.²³ Daher sind es vor allem die tiefen und mittleren Frequenzen, die dafür verantwortlich sind, ob ein Raum gut oder schlecht klingt. Sind die Nachhallzeiten im tiefen Frequenzbereich am längsten, ist der Klang eher dumpf, während längere Nachhallzeiten im mittleren Frequenzbereich für eine warme Färbung sorgen. Um diesen Sachverhalt zu erfassen, wurde das Bassverhältnis BR eingeführt, welches das Verhältnis der Nachhallzeiten bei Frequenzen von 125 Hz und 250 Hz zu Frequenzen von 500 Hz und 1000 Hz ist.

$$BR = \frac{T_{125\text{ Hz}} + T_{250\text{ Hz}}}{T_{500\text{ Hz}} + T_{1000\text{ Hz}}}$$

BR Bassverhältnis (dimensionslos)
T Nachhallzeit in s

Für Musik gelten Werte von BR = 1,0...1,3 als gut und für Sprache Werte von BR = 0,9...1,0.

2.3.5. Hallradius

In der Nähe einer Schallquelle überwiegt der Direktschall, dessen Schallpegel sich mit jeder Entfernungsverdopplung um 6 dB verringert. Da das diffuse Schallfeld überall im Raum annähernd

²³ vgl. Dickreiter 1997, S. 35

gleich ist, gibt es einen Punkt an dem diffuses und direktes Schallfeld den gleichen Schallpegel haben. Dieser Punkt wird Hallradius r_H genannt und die Summe beider Pegel ist 3 dB größer als der der einzelnen Komponenten. Mit steigendem Raumvolumen nimmt der Hallradius zu, verringert sich aber mit zunehmender Nachhallzeit.

$$r_H = 0,057 \sqrt{\frac{V}{T}}$$

r_H Hallradius in m
 V Raumvolumen in m³
 T Nachhallzeit in s

Diese Formel gilt allerdings nur für kugelförmige Schallquellen und Schallempfänger. In der Praxis trifft man allerdings eher auf gerichtete Schallquellen, wie Instrumente, den Mund, Lautsprecher, deren Richtwirkung frequenzabhängig ist. Das heißt, dass der Hallradius mit steigender Frequenz größer wird. Um diesen effektiven Hallradius zu berechnen, muss man noch den Bündelungsgrad mit einbeziehen.

$$r_{H\,eff} = 0,057 \sqrt{\gamma} \cdot \sqrt{\frac{V}{T}}$$

r_H effektiver Hallradius
 γ Bündelungsgrad der Schallquelle (dimensionslos)
 V Raumvolumen in m³
 T Nachhallzeit in s

Durch die Verwendung von gerichtete Mikrofone vergrößert sich der Hallradius ebenfalls. Bei Nieren und Achten um den Faktor 1,7, bei Supernieren um 1,9, bei Hypernieren um 2 und bei Keulen noch etwas mehr. Die Korrekturen des Hallradius aus gerichteten Schallquellen und Schallempfänger multiplizieren sich und in der Praxis liegt der Hallradius bei der Verwendung von Nieren etwa 2 bis 5 mal über dem errechneten Wert von r_H . Bei hohen Frequenzen sogar bis zu 10 mal darüber.²⁴

²⁴ vgl. Dickreiter 1997, S. 36ff.

3. Geschichte der künstlichen Hallerzeugung

3.1. Warum künstlicher Nachhall

Die am meisten angewandte Aufnahmetechnik bei der Musikproduktion ist das „close miking“. Dabei platziert man die Mikrofone nur wenige Zentimeter vom Instrument oder Gesang und wenn mehrere Musiker gleichzeitig aufgenommen werden, trennt man sie untereinander eventuell noch mit akustischen Trennwänden. Dies hat erstens den Vorteil, dass die einzelnen Instrumente so gut wie möglich voneinander getrennt sind und man sie später bei der Mischung unabhängig voneinander bearbeiten kann. Man behält sich somit die größtmögliche kreative Freiheit. Zweitens sind die vorhandenen Rauminformationen nur gering, womit man die oft nicht optimalen akustischen Bedingungen von Aufnahmeräumen, meist handelt es sich um relativ kleine und gedämpfte Räume, umgehen kann.

Da Schallsignale in der Natur immer von Begrenzungsflächen umgeben sind, und sei es auch nur der Boden auf einem freien Feld, würde diese Aufnahme ohne einen vorhandenen Raumeindruck sehr unnatürlich klingen. Seine Bedeutung wird noch dadurch gesteigert, dass er den optischen Eindruck ersetzen muss.

„Der Raumeindruck ist die Hörempfindung, die man beim Erklängen eines Schallereignisses von dem Raum selbst empfängt. Der Raumeindruck ergänzt die akustische Information, die direkt von der Schallquelle kommt, um wesentliche Informationen über die Umgebung, über Größe und Beschaffenheit eines Raumes. Der Raumeindruck besteht aus mehreren Komponenten: die Empfindung von der Breite und Tiefe eines Raumes, von der Raumgröße also, die Empfindung der Halligkeit, die jedes Schallereignis verlängert und mit dem zeitlich folgenden verschmilzt, und die Empfindung der Räumlichkeit. Räumlichkeit ist

die Empfindung, daß Schall aus einem größerem Raumbereich kommt als es der Ausdehnung der Schallquelle entspricht [...]"²⁵

Ein weiterer Nachteil des „close miking“ ist die fehlende Tiefenstaffelung, d.h. alle Instrumente klingen so als würden sie sich im selben Abstand zum Hörer befinden.²⁶ Durch den Einsatz von künstlichem Hall kann man der Aufnahme nun fehlenden Raumeindruck und Tiefenstaffelung hinzufügen.

In der Filmtongestaltung benutzt man Hall um Sprache und Geräusche, die nicht am Set aufgenommen wurden, an den vorhanden Original-Ton anzupassen. Das Hauptaugenmerk des Set-Tonmeisters liegt in erster Linie in der Aufnahme eines verständlichen Dialoges, während andere Geräusche nach Möglichkeit vermieden werden. Dies liegt an der zentralen Rolle der Sprache im Film, wie es schon von Michel Chion beobachtet wurde:

„Why speak of language so early on? Because the cinema is a vococentric or, more precisely, a verbocentric phenomenon.“²⁷

Somit müssen fehlende Töne von einem Geräuschemacher und/oder aus einem Tonarchiv nachträglich hinzugefügt werden. Aber auch Dialog kann aus darstellerischen, inhaltlichen oder technischen Gründen teilweise oder sogar ganz ersetzt werden, z.B bei der Synchronisation in eine andere Sprache. Die nachträglich aufgenommene Dialoge und Geräusche müssen nun an den vorhanden Original-Ton mit Hilfe von Hallgeräten und Equalizern angepasst werden.

²⁵ vgl. Dickreiter 1997, S. 382

²⁶ vgl. Dickreiter 1997, S. 305

²⁷ Übersetzung: „Warum so früh schon über Sprache reden? Weil das Kino ein stimmzentriertes [vococentric], oder präziser, ein verbzentriertes [verbocentric] Phänomen ist.“ vgl. Chion 1994, S. 5

Neben der naturgetreuen Nachbildung kann man Hallgeräte auch kreativ einsetzen, z.B. kann man bei digitalen Hallgerät entgegengesetzt zum natürlichen Hall die Höhen geringer oder sogar gar nicht dämpfen. Man erhält einen brillanter klingenden Hall, was ein gern benutzter Trick bei Popproduktionen ist um sie hochwertiger klingen zu lassen.²⁸ Ein sehr spezieller Effekt ist das Umdrehen der Hallfahne. Statt einer abnehmenden Hallfahne erhält man eine ansteigende die mit dem Direktschall endet. Dieser Effekt wurde unter anderem von Alan Howarth beim Film Poltergeist für die Geisterstimmen benutzt.²⁹

Eine dritte Art der Hallanwendung bei der Filmtongestaltung ist die Gestaltung von Räumen mit Blick auf die erzählerische Wirkung.

„In considering the realist and narrative function of diegetic sounds (voices, music, noise), we must distinguish between the notions of rendering and reproduction. The film spectator recognizes sounds to be truthful, effective, and fitting not so much if they reproduce what would be heard in the same situation in reality, but if they render (convey, express) the feelings associated with the situation.“³⁰

Die exakte akustische Abbildung des Drehortes ist also nicht das Ziel.

²⁸ vgl. Sandmann 2001, S. 68

²⁹ vgl. http://www.youtube.com/watch?v=3_d9uwPJ0t4

³⁰ Übersetzung: „In Anbetracht der realistischen und erzählerischen Funktion diegetischen Tons (Stimmen, Musik, Geräusche) müssen wir zwischen den Begriffen Übersetzung und Reproduktion unterscheiden. Der Filmzuschauer erkennt Klänge nicht unbedingt als wahr, effektiv und passend wenn sie wiedergeben was im selben Moment in der Realität zu hören wäre, sondern wenn sie die mit der Situation assoziierten Gefühle übersetzen (übermitteln, ausdrücken).“

vgl. Chion 1994, S. 109

„Like with the camera going in for close-up shots sometimes, the sound can be decided like all the visual elements. What do you hear? You don't just follow along blindly with what's going on screen. You might be on two people in a room, starting with sound of traffic from outside, then focusing closer and closer with your sound, [...] Think like a director or a DP, staging a scene with equivalent techniques like depth of field, and choose what the audience's ears are focused on.“³¹

3.2. Hallraum

Die erste Methode künstlich Nachhall zu erzeugen, war das zu verhallende Signal über Lautsprecher in einen Raum mit stark reflektierenden Wänden zu spielen, mit Mikrofonen wieder aufzunehmen und dann dem Ursprungssignal als räumlichen Anteil zuzumischen. Der Hallraum blieb lange Zeit der Standard zur Erzeugung von hochwertigem künstlichem Nachhall. Diese Methode wurde von vielen Projektstudios noch bis in die 90er Jahre benutzt, bevor es auch für den nichtprofessionellen Bereich erschwingliche Hallgeräte gab. Man nutzte einfach den am stärksten hallenden Raum, was meist das Bad war. Schallzerstreuende Oberflächen sorgen dabei für einen diffuseren Hall und helfen, neben nicht parallelen Wänden, bei der Vermeidung von Flatterechos. Der Raum sollte gegen Luft- und Körperschall isoliert werden und um eine hohe Eigenfrequenzdichte zu erhalten mindestens 50 m³ groß sein,³² andere Quellen meinen sogar 500 m³.³³ Bei der Luxusausführung kann man die Nachhallzeit sogar durch ferngesteuerte Wände ändern. Dadurch kann ein Hallraum sehr teuer werden, weswegen

³¹ Übersetzung: „Wie wenn eine Kamera für Nahaufnahmen heranrückt, kann auch der Ton wie alle visuellen Elemente gestaltet werden. Was hört man? Man folgt nicht einfach blindlings dem, was auf der Leinwand zu sehen ist. Man ist möglicherweise bei zwei Leuten in einem Raum, beginnt mit Verkehrsgeräuschen von draußen und geht dann mit dem Ton immer näher ran, [...] Denke wie ein Regisseur oder ein Kameramann, gestalte die Szene mit ähnlichen Mitteln wie Tiefenschärfe und entscheide worauf das Ohr des Publikums fokussiert werden soll.“

vgl. Sonnenschein 2001, S. 162

³² vgl. Dickreiter 1997, S. 385

³³ vgl. Sandmann 2001, S. 55

einige Studios einfach ihre Treppenhäuser, Dachkammern oder Keller nutzen.³⁴

Um Direktschall möglichst zu verhindern, strahlen die Lautsprecher am besten gegen eine Wand. Ansonsten würde es bei der Mischung mit dem Ursprungssignal zu Kammfiltereffekten kommen. Aufgrund der relativ kleinen Dimensionierung von Hallräumen beträgt das Predelay nur wenige Millisekunden.³⁵ Da aber erst ein Predelay von 20 - 50 ms ein Signal erzeugt, was sehr räumlich und trotzdem weit vorne ist³⁶, wird das zu verhallende Signal verzögert über ein Delay in den Raum gegeben.

3.3. Worldizing

Als Abwandlung des Hallkammerprinzips könnte man das von Walter Murch Worldizing genannte Verfahren sehen, welches zum Ersten mal in diesem Umfang beim Film „American Graffiti“ (1973) angewendet wurde.

„George and I took the master track of the radio show and played it back on a Nagra in a real space - a suburban backyard. I was fifty-or-so-feet away with a microphone recording that sound onto another Nagra, [...] moving the microphone [...] back and forth, as George moved the speaker through 180 degrees. There were times when microphone and speaker were pointed right at each other, and there were other times when they were pointed in completely opposite directions.. So that was a separate track. Then, we did it that whole thing again.

When I was mixing the film, I had three tracks to draw from. One of them was [...] the „dry studio track“ of the

³⁴ vgl. Case 2007, S. 274

³⁵ vgl. Case 2007, S. 275f.

³⁶ vgl. <http://www.sengpielaudio.com/AnfangszeitlueckeUndPredelay.pdf>

radio show, where the music was very clear and sharp and everything was in audio focus. Then there were the other two tracks [...] on which the axis of the microphone and the speaker was never the same [...]. I was able to blend those three tracks to get the right amount of atmosphere. I could make transitions from a live, very present sound to something that sounded like it was very distant and bouncing off many buildings. I could create a sense of movement too - hence, the moving microphones.“³⁷

3.4. Mechanische Hallgeräte

3.4.1. Federhall

Bei der Einführung der Hammond Orgel 1935 erwarteten die Leute den selben raumerfüllenden Klang den sie aus Kirche und Theater kannten, aber in ihren kleinen Wohnzimmern nicht erhielten. Laurens Hammond suchte daraufhin nach einer Möglichkeit seinen Orgeln die fehlende Fülle und Räumlichkeit zu verpassen und wurde bei den Bell Laboratories, die ein Gerät entwickelt hatten, um die Verzögerung bei Ferngesprächen zu simulieren, fündig. Dies wurde erreicht, indem eine Feder zur Signalübertragung genutzt wurde. Nachdem er das Gerät so modifizierte, dass es mehrere Echos erzeugen konnte, war es perfekt für seine Bedürfnisse. Weite

³⁷ Übersetzung: „George und ich spielten den Mastertrack der Radioshow über eine Nagra in einer echten Umgebung ab - einem vorstädtischem Hinterhof. Ich war etwa 15 Meter entfernt und nahm diesen Ton mit einem Mikrofon auf einer anderen Nagra auf [...], dabei bewegte ich das Mikrofon [...] vor und zurück, während George den Lautsprecher um 180 Grad drehte. Es gab Zeiten da zeigten Mikrofon und Lautsprecher genau aufeinander, und Zeiten, in denen sie in genau entgegengesetzte Richtungen zeigten. Dies war eine einzelne Spur. Dann wiederholten wir das Ganze.“

Als ich den Film mischte, hatte ich drei Spuren zur Auswahl. Eine von ihnen war [...] die „trockene Studiospur“ der Radioshow, wo die Musik sehr klar und präsent war und alles war im Mittelpunkt. Dann waren dort die anderen zwei Spuren [...] wo die Ausrichtung zwischen Mikrofon und Lautsprecher nie die selbe war [...]. Ich war in der Lage diese drei Spuren zu mischen um den richtigen Anteil von Atmosphäre zu erhalten. Ich konnte Überblendungen von einem lebendigen, sehr präsenten Klang zu etwas, dass klang, als wäre es sehr weit entfernt und würde von mehreren Gebäuden reflektiert werden. Ich konnte auch die Empfindung von Bewegung erschaffen - deswegen die bewegten Mikrofone.“

vgl. <http://www2.yk.psu.edu/~jmj3/murchfq.htm>

Verbreitung fand der Federhall dann, als ihn Leo Fender in seinen Gitarrenverstärkern verbaute.³⁸

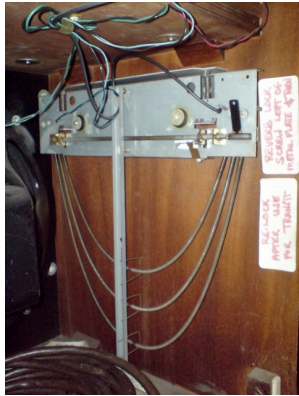


Abb. 2 Federhall in Hammondorgel

Bei einem Federhall wird eine oder mehrere freischwingende Federn auf einer Seite elektromagnetisch zu Torsionsschwingungen angeregt und diese dann auf der anderen Seite elektromagnetisch wieder abgenommen. Bei einer einfachen Feder durchläuft das Signal die Feder und wird am Ende reflektiert. Sie liefert somit nur eine Serie von im Pegel abnehmenden Einzelreflexionen, auch Flatterechos genannt. Um die Zahl und zeitliche Dichte der Reflexionen für einen natürlicheren Nachhall zu erhöhen, werden verschiedene Störstellen auf die Feder gebracht, an denen weitere Reflexionen entstehen: Ätzstellen für hohe, Dellen für mittlere und Dämpfungsscheiben für Frequenzen unter 200 Hz.³⁹ An den Enden der Hallfeder befindet sich je eine Erreger- und Abnehmerspule, wobei die Erregerspule gleichphasig und die Abnehmerspule gegenphasig geschaltet ist. Somit werden die gleichphasigen Flatterechos ausgelöscht und die Feder liefert nur noch diffusen Hall. Um einen Stereohall zu erhalten braucht man zwei getrennte Geräte. Diese liefern zwei voneinander unabhängige Signale, die nur an den Seiten, aber nicht in der Mitte der Stereobasis abgebildet werden, was unnatürlich klingt. Um zusätzlichen Mittenhall zu erzeugen, kann man entweder die Summe der Hallsignale zumischen oder die

³⁸ vgl. <http://www.accutronicsreverb.com> unter History

³⁹ vgl. Dickreiter 1997, S. 389f.

einzelnen Hallsignale als M/S betrachten. Heutzutage wird der Federhall nur noch wegen seinem speziellem Klangcharakter benutzt, der aufgrund der geringen Eigenfrequenzdichte eine metallische Färbung aufweist. Ein weitere Nachteil ist die Stoßanfälligkeit, die sich in einem lauten Scheppern äußert, was aber einige Musiker, wie Jon Lord, kreativ nutzen.

3.4.2. Hallplatte

Eine wesentliche Verbesserung gegenüber dem Federhall war die Hallplatte EMT 140, die von Dr. Walter Kuhl entwickelt und 1957 von der Firma EMT eingeführt wurde.⁴⁰ Sie liefert einen dichten und diffusen Hall, der auch heute noch gern für Gesang und Schlagzeug benutzt wird, dann allerdings meist als Simulation in einem digitalem Hallgerät. Aufgrund ihrer Größe und ihrem Gewicht von etwa 170 kg ist sie nicht mobil einsetzbar und da sie leicht durch Luftschall angeregt werden kann, muss sie an einem vibrations- und geräuscharmen Ort aufgestellt werden. Trotz dieser Einschränkungen ist sie billiger als der Bau eines Hallraums und sie blieb bis 1972 das einzige Hallgerät in Studioqualität. 1961 brachte EMT dann mit dem Model 140s eine Stereoversion der Hallplatte raus.⁴¹

Das Konstruktionsprinzip einer Hallplatte besteht aus einer etwa 1 x 2 Meter großen und 0,5 mm dicken Stahlplatte, die mit gespannten Stahldrähten in einen starren Rahmen aufgehängt ist und von einem dynamischen Wandler zu Biegeschwingungen angeregt wird. Diese Schwingungen werden von zwei piezoelektrischen Wandlern (Kontaktmikrofone) abgenommen, die sich in unterschiedlichem Abstand zum Erreger befinden, um ein statistisch verteiltes Richtungssignal zu erhalten. Die Nachhallzeit konnte durch den Abstand einer poröse Dämpfungsplatte im Bereich von 1 - 5 s bei 500 Hz verändert werden. Die Dämpfungsplatte

⁴⁰ vgl. <http://mixonline.com/TECnology-Hall-of-Fame/1976-EMT-reverb>

⁴¹ vgl. <http://mixonline.com/TECnology-Hall-of-Fame/EMT-140-reverb-090106>

hemmt die Bewegungen der Luftteilchen, die durch die Schwingung der Platte angeregt werden und entzieht somit der Platte Bewegungsenergie, wodurch die Schwingungen bedämpft werden. Je kleiner der Abstand der Dämpfungsplatte zur Hallplatte, desto kürzer die Nachhallzeit. Ein kurzer direkter Schall lässt sich nicht vermeiden und wie bei der Hallkammer wird für die Simulation von größeren Räumen ein Delay benötigt. Zwar besitzt die Hallplatte gegenüber dem Federhall eine größere Eigenresonanzdichte und somit eine geringere metallische Klangfärbung, aber sie ist noch zu gering um diese vollständig zu vermeiden.

3.4.3. Hallfolie

1972 präsentierte EMT dann die Weiterentwicklung der Hallplatte, die EMT 240. Dabei handelt es sich um das selbe Prinzip wie bei der Hallplatte, nur dass die Stahlplatte gegen eine 18 μm dicke, 27 x 29 cm große Goldfolie ausgetauscht wurde.⁴² Da die Wellenlänge von Schall in Gold kleiner ist, musste das Geber- und Nehmersystem noch an die kleinere Wellenlänge angepasst werden. Neben der besseren Klangqualität verringerte sich somit auch das Gewicht (ca. 65 kg, im

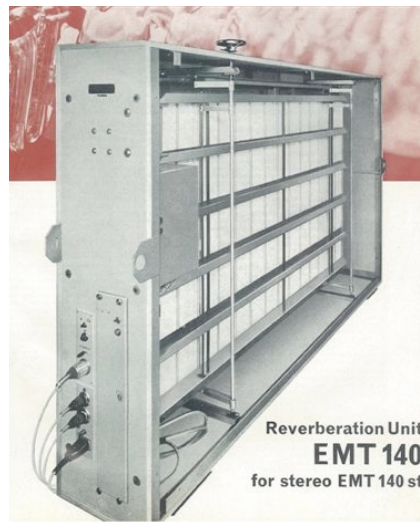


Abb. 3 EMT 140

Vergleich, die EMT 140 wog etwa 180 kg⁴³) und das Volumen. Sie ist somit transportabel, auch wenn sie trotzdem noch ein dicker Brocken ist. Die Luftschalldämmung ist groß genug um eine Aufstellung im Regieraum oder Ü-Wagen zu ermöglichen, wobei aber Stöße zu vermeiden sind. Die Nachhallzeit beträgt wie bei der Hallplatte etwa 1 - 5 s bei 500 Hz, der Frequenzgang entspricht dabei aber ungefähr dem natürlichen Hall, also abnehmende Nachhallzeit bei höheren Frequenzen, zunehmende bei tieferen. Die Eigenresonanzdichte ist

⁴² vgl. Dickreiter 1997, S. 387f.

⁴³ vgl. <http://mixonline.com/TECnology-Hall-of-Fame/EMT-140-reverb-090106>

ausreichend um eine metallische Klangfärbung zu vermeiden. Der Aufsprechverstärker enthält einen Limiter zum Schutz gegen Übersteuerungen und der Wiedergabeverstärker ist mit einem Expander ausgerüstet, der zwar die Nachhallzeit um etwa 10% verkürzt, dafür aber den eigenen und den Fremdstörmpegel reduziert.

3.5. Elektronische Hallgeräte

Alle vorherigen Methoden der künstlichen Nachhallerzeugung haben das Problem der nötigen Schallisolierung, was bei rein elektronischen Hallgeräten entfällt. Erste Patente dafür gab es von RCA Anfang/Mitte der 50er Jahre.⁴⁴ Dabei wird kein real existierender Raum akustisch oder elektromechanisch zum Schwingen angeregt, sondern der Hall wird auf einfachste Weise durch Echos elektronisch nachgeahmt. Zuerst wurden dafür 3-Kopf-Bandmaschinen benutzt. Dabei wurde das Wiedergabesignal zurück zum Aufnahmekopf geführt, wodurch aufgrund des Abstandes zwischen Wiedergabe- und Aufnahmekopf ein Echo erzeugt wird, was kurz genug ist, um es als erste Reflexion zu interpretieren. Dadurch wird ein gewisser Raumeindruck erzeugt, jedoch muss man dabei auf den Nachhall verzichten. Ein weiterer Nachteil ist, dass jedes Echo eine Kopie ist und sich so mit jeder Generation die Klangqualität verschlechtert.⁴⁵ Später wurden dann Eimerkettenschaltungen, eine Aneinanderreihung von mehreren Kondensatoren, genutzt. Der dabei entstehende Hall klingt sehr unnatürlich, da er nur eine geringe Reflexionsdichte und Nachhallzeit besitzt und der Signal-Rauschabstand niedrig ist.

⁴⁴ vgl. <http://www.freepatentsonline.com/2674660.pdf>

⁴⁵ vgl. Sandmann 2001, S. 68

3.6. Digitale Hallgeräte

1976 wurde das erste volldigitale Hallgerät eingeführt und wieder war es die Firma EMT, diesmal mit dem EMT 250, die dabei federführend war.⁴⁶ Digitale Hallgeräte bilden die Vorgänge der Hallentstehung in realen Räumen modellhaft nach. Die erste Idee dafür war, das Tonsignal mit einem digitalem Verzögerungsgerät zu verzögern und dieses entstehende Signal wieder dem Eingang zuzuführen bis die Reflexionen abgeschwächt sind. Dabei war aber bei längeren Verzögerungen eine Abfolge von einzelnen Reflexionen deutlich zu hören und bei kurzen Verzögerungen kam es zu Klangfärbung durch Kammfiltereffekte. Dies wurde durch die Parallelschaltung von mehreren Verzögerungsleitungen mit verschiedenen Verzögerungszeiten und der Nachschaltung von ebenfalls verzögernden, rückgekoppelten Allpässen verbessert.⁴⁷ Mit digitalen Hallgeräten war es nun möglich, die einzelnen Parameter des künstlichen Nachhalls in weiten Grenzen einzustellen und somit einerseits sehr natürlich klingenden Nachhall zu erzeugen, aber auch die Erzeugung von so nie in der Natur vorkommenden Halls. Heutzutage sind digitale Hallgeräte Studiostandard und mit der gestiegenen Leistungsfähigkeit von Computern ist es seit Anfang der 90er Jahre möglich, Hallgeräte in reiner Software-Form auf Standard-PCs zu betreiben.



Abb. 4 EMT 250

⁴⁶ vgl. <http://mixonline.com/TECnology-Hall-of-Fame/1976-EMT-reverb>

⁴⁷ vgl. http://mixonline.com/online_extras/blesser-patent.pdf

3.6.1. Faltungshall

Bereits 1975 befasste sich Michael Gerzon in einem Artikel mit der Frage, ob es nicht möglich wäre, in Musikaufnahmen Informationen zu integrieren, mit denen man mit einer zukünftigen Technologie das ursprüngliche Schallfeld wiederherstellen kann. Er beschreibt ein Verfahren, mit dem man eine von einem beliebigen Raum gemessene Impulsantwort mit einem beliebigen Signal falten und diesem somit den klanglichen Charakter des gemessenen Raumes aufprägen kann.⁴⁸

Aufgrund der benötigten Rechenleistung erscheint erst 1995 mit dem Huron der Firma Lake DSP, heute zur Firma Dolby gehörend, ein Gerät, mit welchem diese Technologie in Echtzeit anwendbar ist.⁴⁹ Mit steigender Leistungsfähigkeit von Prozessoren ist es dann ab 2001 auch möglich auf Standardcomputern Faltungshall in Software-Form zu verwenden, als Beispiel sei hier die Firma Audio Ease mit ihrem Plug-In Altiverb genannt.

Faltungshall soll es ermöglichen, dass jedem Eingangssignal ein Nachhallverlauf aufgeprägt werden kann, der sich zeitlich und spektral nicht von einem im realen Raum aufgenommenem Nachhall unterscheidet.⁵⁰

⁴⁸ vgl. http://www.acoustics.net/objects/pdf/review_aes_gerzon01.pdf

⁴⁹ vgl. <http://www.sheffield.ac.uk/content/1/c6/01/79/48/HuronMan32.pdf>

⁵⁰ vgl. Weinzierl 2008, S. 754

4. Grundlagen der Signalverarbeitung

4.1. Signale

Ein Signal $x(t)$ beschreibt, wie ein Parameter mit einem anderen Parameter zusammenhängt und repräsentiert somit Information. Wenn die Parameter beliebig fein abgestufte Werte annehmen können, handelt es sich um ein kontinuierliches Signal. Wenn sie nur bestimmte Werte annehmen können, spricht man von diskreten Signalen. Eine Mischform, bei der ein Parameter diskret und der andere kontinuierlich ist, existiert zwar, ist aber äußerst selten.⁵¹

Ein analoges Audiosignal beispielsweise ist ein zeit- und amplitudenkontinuierliches Signal, während ein digitales Audiosignal zeit- und amplitudendiskret ist. Um kontinuierliche und diskrete Signale unterscheiden zu können, beschreibt man sie mathematisch als $x(t)$ für kontinuierliche und $x[n]$ für diskrete Signale.⁵²

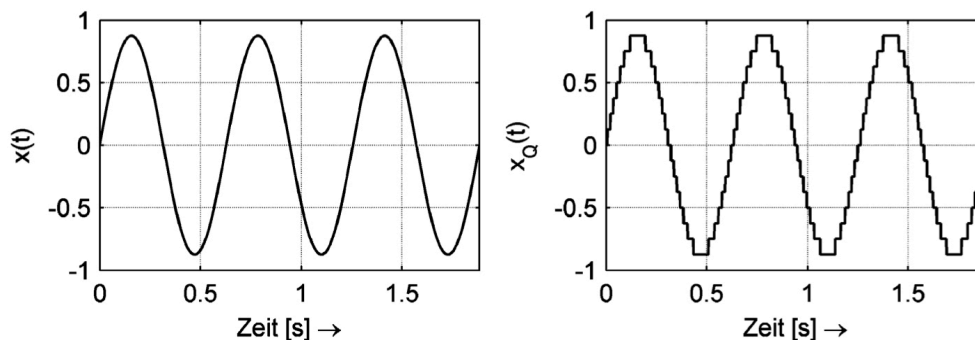


Abb. 5 kontinuierliches (analoges) Signal

diskretes (digitales) Signal

4.2. Systemtheorie

Ein System ist ein Prozess, bei dem die Zuführung eines Eingangssignals $x(t)$ ein Ausgangssignal $y(t)$ produziert.

$$y(t) = L\{x(t)\}$$

⁵¹ vgl. <http://www.dspguide.com/ch2/1.htm>

⁵² vgl. <http://www.dspguide.com/ch5/1.htm>

Es gibt diskrete und kontinuierliche Systeme. Ein Computer ist zum Beispiel ein diskretes System.

Von besonderer Bedeutung sind lineare und zeitinvariante Systeme, auch LTI-Systeme (linear time invariant systems) genannt. Diese können nämlich vollständig beschrieben werden, wenn man dem Eingangssignal einen Dirac-Impuls zufügt und diesen mit dem Ausgangssignal, der sogenannten Impulsantwort, vergleicht.⁵³

LTI-Systeme

Ein System ist linear, wenn es homogen und addierbar ist. Homogen bedeutet, dass eine Veränderung am Eingangssignal in eine entsprechende Veränderung am Ausgangssignal resultiert. Addierbar ist ein System, wenn man zwei Eingangssignale, $x_1(t)$ und $x_2(t)$ hat, die jeweils ein Ausgangssignal, $y_1(t)$ und $y_2(t)$, erzeugen und wenn ein Eingangssignale $x_1(t) + x_2(t)$ ein Ausgangssignal $y_1(t) + y_2(t)$ erzeugt. Addierte Eingangssignale beeinflussen sich also nicht gegenseitig.⁵⁴

Wenn ein System linear ist, ist es auch statisch linear. Dass heißt, dass das Ausgangssignal immer gleich dem Eingangssignal multipliziert mit einer Konstanten ist. Eine andere wichtige Eigenschaft linearer Systeme ist, dass eine Sinusschwingung am Eingang, eine Sinusschwingung mit der gleichen Frequenz am Ausgang erzeugt, aber möglicherweise mit anderer Amplitude oder Phase.⁵⁵

Ist die Linearität eines Systems gegeben, so gilt das Superpositionsprinzip. Ein komplexes Eingangssignal $x(t)$ erzeugt ein Ausgangssignal $y(t)$. Nun kann man das komplexe Eingangssignal in mehrere einfachere Signale $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$ zerlegen, diese einzeln durch das System leiten und die resultierenden Ausgangssignale $y_1(t), y_2(t), \dots, y_n(t)$ addieren und erhält somit das Ausgangssignal $y(t)$.

Zeitinvariant ist ein System, wenn es zu jedem Zeitpunkt auf eine Erregung gleich reagiert, also eine Zeitverschiebung am Eingang

⁵³ vgl. Weinzierl 2008, S. 13ff

⁵⁴ vgl. <http://www.dspguide.com/ch5/2.htm>

⁵⁵ vgl. <http://www.dspguide.com/ch5/3.htm>

erzeugt ein ebenso zeitverschobenes aber ansonsten unverändertes Ausgangssignal.

4.3. LTI-Systeme in der Theorie und Praxis

Inwieweit kann man jetzt nun die Theorie in der Praxis anwenden? Systeme sind in der Realität meistens nicht durchgehend linear. Elektronische Audiogeräte übersteuern z.B. ab einem bestimmten Pegel und reagieren dann nicht mehr linear, außerdem fügen elektrische Bauteile dem System immer etwas Rauschen zu. In Räumen kann es vorkommen, dass Einrichtungsgegenstände anfangen hörbar mitzuschwingen oder dass durch Luftbewegungen, z.B. durch Wind oder Temperaturschwankungen, Zeitinvarianzen entstehen. Wie geht man nun damit um? Erstens kann man Nichtlinearitäten oder Zeitinvarianzen einfach ignorieren, wenn diese klein genug sind. Auftretende Fehler werden einfach als Rauschen toleriert oder nicht berücksichtigt. Um Nichtlinearitäten durch zu hohe Pegel zu verhindern, führt man dem System einfach Signale mit einem niedrigeren Pegel zu, bei dem das System noch linear reagiert.⁵⁶

4.4. Faltung

Faltung ist ein mathematischer Weg zwei Signale zu kombinieren und somit ein drittes zu formen. Mit ihr kann man die Beziehung von Eingangssignal, Ausgangssignal und Impulsantwort eines LTI-Systems beschreiben. Wenn man die Impulsantwort $h(t)$ eines LTI-Systems kennt, lassen sich dessen Eigenschaften auf jedes beliebige Eingangssignal durch Faltung aufprägen.

$$y(t) = h(t) * x(t)$$

Das Symbol $*$ steht dabei für Faltung und nicht für Multiplikation.

Das Eingangssignal wird dabei zuerst in seine einzelnen Komponenten zerlegt, bei analogen Signalen in Impulse, bei digitalen Signalen in die einzelnen Abtastwerte (Samples), und dann

⁵⁶ vgl. <http://www.dspguide.com/ch5/8.htm>

wird die Impulsantwort, skaliert mit der Amplitude der Komponente, angehängt. Das Ausgangssignal ergibt sich nun aus den addierten verschobenen und skalierten Impulsantworten.⁵⁷ Da die Faltung von kontinuierlichen Signalen wesentlich komplizierter ist, werde ich mich im folgendem auf diskrete Signale beschränken.⁵⁸

4.4.1. Impuls und Impulsantwort

Ein Impuls ist ein Signal, welches außer an einer Stelle aus lauter Nullen besteht. Um nun die Impulsantwort $h[n]$ eines Systems zu erhalten, muss man diesem einen Impuls von unendlich kurzer Dauer und unendlich großer Amplitude zuführen. Dieser Impuls wird Dirac-Impuls oder auch Delta-Funktion $\delta[n]$ genannt. Da es bei diskreten Signalen keine unendlich kurze Dauer und unendlich große Amplitude gibt, kann es ihn nur angenähert geben und zwar mit einem Wert von 1 bei Sample 0, während alle anderen Samples einen Wert von 0 besitzen. Jeder Impuls kann auch als eine versetzte und skalierte Delta-Funktion angesehen werden. Ein Signal $a[n]$ welches an Sample 8 den Wert -3 und an jeder anderen Stelle den Wert 0 besitzt, ist das Selbe wie eine Delta-Funktion, die um 8 Samples versetzt und mit dem Wert -3 multipliziert ist.⁵⁹

$$a[n] = -3\delta[n-8]$$

4.4.2. Fourier Transformation

Aufgrund der vielen Multiplikationen und Additionen, die bei der Berechnung einer Faltung von Signalen im Zeitbereich nötig sind, ist der Rechenaufwand sehr hoch. Wenn man z.B. ein Signal mit einer 512 Sample langen Impulsantwort falten will und dafür ein 200 MHz schnellen Prozessor verwendet, kann dieses System etwa 1000 Samples pro Sekunde erzeugen. Dies ist etwa 40x zu langsam für Audiodaten in CD-Qualität. Zwar sind heutige Prozessoren

⁵⁷ vgl. Weinzierl 2008, S. 1094f

⁵⁸ vgl. <http://www.dspguide.com/ch6/1.htm>

⁵⁹ vgl. <http://www.dspguide.com/ch6/1.htm>

wesentlich schneller, aber um ein Audiosignal durch Faltung zu verhallen, werden in der Regel Impulsantworten von mindestens 1-2 Sekunden benutzt. Bei einer Samplingrate von 44,1 kHz sind das dann 44100 Samples pro Sekunde, bei Stereosignalen verdoppelt sich die Anzahl. Heutzutage werden auch durchaus Samplingraten von 96 kHz, teilweise sogar 192 kHz verwendet. Dieser Rechenaufwand ist auch von heutigen Computern nicht zu bewältigen. Es gibt aber eine Möglichkeit, den Rechenaufwand zu verringern, die Fast Fourier Transformation (FFT).⁶⁰

Nach Jean Baptiste Joseph Fourier kann man jedes kontinuierliche periodische Signal in eine Summe passend gewählter Sinus- und Kosinusschwingungen zerlegen und es somit von einer Darstellung im Zeitbereich in eine Darstellung im Frequenzbereich transformieren. Diese Transformation ist für kontinuierliche Signale nur eingeschränkt möglich, z.B. lassen sich Rechtecksignale nicht durch die Summe mehrerer Sinusschwingungen erzeugen auch wenn man sehr nah rankommt. Für die uns interessierenden diskreten Signale trifft sie aber vollständig zu. Im EDV- und DSP-Bereich bevorzugt man die Diskrete Fourier Transformation (DFT). Zwar setzt sie die Periodizität des zu analysierenden Signals voraus, aber um aperiodische Signale zu transformieren, wird einfach ein Ausschnitt des Signals genommen und so behandelt als wäre es periodisch.⁶¹

Die Faltung kann man jetzt also umgehen, indem die beiden zu faltenden Signale durch DFT in den Frequenzbereich transformiert, dann multipliziert und das Ergebnis durch inverse DFT zurück in den Zeitbereich transformiert wird. Das durch DFT erzeugte Ausgangssignal ist mit dem durch Faltung erzeugten identisch. Die Berechnung durch DFT benötigt aber genauso viel Rechenleistung wie durch Faltung. Hier kommt jetzt die FFT ins Spiel. Sie ist eine äußerst effiziente Form zur Berechnung der DFT, die auf einer

⁶⁰ vgl. <http://www.dspguide.com/ch9/3.htm>

⁶¹ vgl. <http://www.dspguide.com/ch8/1.htm>

Zerlegung eines N Punkte langen Zeitsignals in N jeweils einen Punkt lange Zeitsignale, und die anschliessende Zusammenfassung der resultierenden N Spektren in ein Spektrum beruht.⁶² Aufgrund der Komplexität werde ich aber nicht weiter auf die Funktionsweise eingehen.

4.5. Anregungssignale für die Messung der Impulsantwort

Für die Messung der Impulsantwort von akustischen Systemen muss das Anregungssignal bestimmte Kriterien erfüllen. Es muss die Frequenzen des Hörbereichs abdecken und genügend Energie besitzen um einen möglichst hohen Signal-Rauschabstand zu erhalten damit Störungen die Messung nicht verfälschen. Bei der Messung von Raumimpulsantworten werden heutzutage zwei Methoden verwendet, die ich nachfolgend näher erläutern werde.

Impuls

Die einfachste Art eine Impulsantwort von einem akustischen System zu erhalten, ist die Verwendung von Impulsen. Sie basiert auf der unmittelbaren Umsetzung der Theorie über die Reaktion von LTI-Systemen auf einen Dirac-Impuls/Delta-Funktion in die Realität. Dafür erzeugt man einen idealen Impuls und nimmt diesen dann auf. Vorteil dieser Methode ist der unmittelbare Erhalt der Impulsantwort und aufgrund der kurzen Messdauer eine große Unempfindlichkeit gegenüber Zeitinvarianzen. Bei der rein elektrischen Messung von z.B. Effektgeräten wie Equalizern, Hallgeräten usw. ist diese Methode häufig ausreichend.⁶³ Bei der akustischen Messung von z.B. Räumen kann man einen Impuls mit unendlich kurzer Dauer und unendlich hoher Amplitude aber nur näherungsweise erzeugen. In der Praxis werden dafür häufig Starterpistolen, platzende Luftballons, Lautsprecher oder notfalls auch Klatschen benutzt.⁶⁴ Aufgrund der kurzen Dauer des Anregungssignals kann man nicht ausreichend Energie in den Raum abstrahlen um einem genügend hohen Signal-

⁶² vgl. <http://www.dspguide.com/ch12/2.htm>

⁶³ vgl. Weinzierl 2008, S. 1097

⁶⁴ vgl. Müller/Massarani 2001, S. 23

Rauschabstand zu erhalten. Dies wird vor allem zu den tiefen Frequenzen hin problematische, weil dort die Energie des Störschallpegels in Räumen stark zunimmt und wird noch dadurch verstärkt, dass bei den meisten Arten der Impulserzeugung die Energie im mittleren und hohen Frequenzbereiche konzentriert ist. Abgesehen von der Wiedergabe über Lautsprecher sind die Impulse im Zeit- und Frequenzbereich und auch hinsichtlich der Richtcharakteristik nicht reproduzierbar⁶⁵ und somit ist z.B. die Erzeugung einer Surroundimpulsantwort mit nur zwei Mikrofonen, indem man mehrere Messungen mit unterschiedlichen Mikrofonpositionen durchführt, nur eingeschränkt möglich. Bei der Wiedergabe eines Impulses über Lautsprecher kann es aufgrund der Anforderung der unendlich kurzen Dauer und unendlich großen Amplitude leicht zu Verzerrungen kommen, die sich dann in der Impulsantwort widerspiegeln.

Sinus-Sweep

Ein Sinus-Sweep ist ein Sinuston, der mit fortlaufender Zeit in der Frequenz steigt. Bei der Messung mit einem Sinus-Sweep wird dieser über Lautsprecher in den Raum gespeist und mit Mikrofonen aufgenommen. Um nun die Impulsantwort zu erhalten, müssen die Frequenzen im aufgenommenem Signal in der Zeit so verschoben werden, dass sie gleichzeitig auftreten. Angelo Farina und Regev Ayalon schlagen die Verwendung eines logarithmischen Sweeps, also einem Sweep, bei dem die Frequenz in einer bestimmten Zeit um eine Oktave steigt, mit einer Startfrequenz von 22 Hz, einer Endfrequenz von 22 kHz und einer Länge von 15 s. Mit diesen Werten sollen Impulsantworten mit einem Signal-Rauschabstand von 90 dB möglich sein.⁶⁶ Dieser hohe Wert lässt sich damit begründen, dass der Sinus-Sweep wesentlich länger ist als ein Impuls und somit über diesen Zeitraum wesentlich mehr Energie in den Raum abgestrahlt werden kann. Die Messung mit Sweep ist auch relativ tolerant gegenüber Zeitvarianzen und völlig unempfindlich

⁶⁵ vgl. Müller/Massarani 2001, S. 23

⁶⁶ vgl. Farina/Ayalon o.J., S. 2

gegenüber harmonischen Verzerrungen. Diese werden nämlich einfach bei der Berechnung der Impulsantwort in den negativen Zeitbereich verschoben und können dann leicht entfernt werden. Das kann man sich folgendermaßen vorstellen: angenommen der Sweep durchläuft 100 Hz nach 100 ms und 200 Hz nach 200 ms. Um die Impulsantwort zu erhalten, muss das Spektrum bei 100 Hz um -100 ms und die Frequenzen bei 200 Hz um -200 ms verschoben werden. Tritt jetzt nun während der Messung bei 100 Hz eine Verzerrung der zweiten Ordnung auf, also eine Harmonische bei 200 Hz, setzt sich das aufgenommenem Signal bei 100 ms nun jeweils aus einer Komponente bei 100 Hz und 200 Hz zusammen. Bei der Berechnung der Impulsantwort wird jetzt die Komponente bei 200 Hz um -200 ms verschoben und taucht somit 100 ms vor dem Beginn der Impulsantwort auf.⁶⁷

⁶⁷ vgl. Müller/Massarani 2001, S. 15

5. Vorüberlegungen zur Erstellung der Impulsantwort

5.1. Software

Um erste Erfahrungen mit Faltungshall und der Erstellung eigener Impulsantworten zu sammeln, kann man auf kostenfreie Software zurückgreifen. Zum Erzeugen von Sweeps und der Entfaltung der Messsignale kann man den Voxengo Deconvolver benutzen, der zwar nur für Windows entwickelt wurde, aber mit Wine auch unter OS X und Linux läuft. Das bekannteste Freeware Faltungshall-Plug-In ist wohl SIR von Christian Knufinke, welches allerdings nur für Windows erhältlich ist. Unter Windows, OS X und Linux läuft dagegen HybridReverb2. Sollte man keine DAW (Digital Audio Workstation) besitzen, kann man Audacity verwenden, welches ebenfalls plattformunabhängig ist.

Kostenpflichtige Plug-Ins gibt es z.B. von Waves (IR-1), Audio Ease (Altiverb) und Apple (Space Designer). Vorteile gegenüber den Freewarelösungen sind eine umfangreiche Bibliothek an fertigen Impulsantworten, eine größere Eingriffsmöglichkeit und Tools, die das Erstellen eigener Impulsantworten erheblich vereinfachen.

5.2. Anregungssignal

Wie weiter oben schon erläutert, werden die qualitativ besten Ergebnisse mit einem Sinus-Sweep erzielt. Für die Dauer des Sweeps gilt, dass sie:

- länger sein muss als die Nachhallzeit
- lang genug sein muss, um einen ausreichenden Signal-Rauschabstand zu erhalten
- möglichst kurz, um zu verhindern, dass Zeitinvarianzen (z.B. Wind) das Messergebnis verfälschen

Sollte es aufgrund von nicht vermeidbaren Störgeräuschen (z.B. Verkehrslärm) nicht möglich sein einen ausreichenden Signal-

Rauschabstand zu erhalten, kann man auch mehrere Messungen durchführen und die Ergebnisse mitteln. Dabei macht man sich zu nutze, dass bei der Mischung von zwei korrelierten, also gleichen Signalen, der Pegel um 6 dB und bei unkorrelierten nur um 3 dB steigt. Pro Verdopplung der Messungen nimmt der Signal-Rauschabstand also um 3 dB zu.

Die Messung mit einem Sweep erfordert einen Zuspieler, Verstärker und Lautsprecher. Diese Komponenten können einzeln oder vereint in einem Gerät vorkommen. Für den mobilen Einsatz ist im Sinne einer Minimierung des Aufwandes ein möglichst kompaktes Gerät zu bevorzugen, welches bei Batteriebetrieb auch noch Unabhängigkeit von einer Stromquelle ermöglicht.

Ist es aus welchen Grund auch immer nicht möglich einen Sweep als Anregungssignal zu benutzen, so sollte die Messung mit einem Impuls durchgeführt werden. Zwar ist er qualitativ dem Sweep unterlegen, aber immer noch besser als überhaupt keine Impulsantwort. Dabei sollte auf die Zumutbarkeit geachtet werden. Da für einen ausreichenden Signal-Rauschabstand ein möglichst hoher Pegel erforderlich ist, könnten sich einige Leute gestört fühlen, im Falle einer Starterpistole sogar bedroht. Um sich Ärger mit der Polizei zu ersparen, sollte auf die Verwendung einer Starterpistole eh verzichtet werden.

5.3. Wiedergabesystem

Nach ISO 3382 ist für die Anregung eines Raumes eine möglichst kugelförmige Schallquelle zu benutzen. Dafür wurde extra ein Dodekaeder-Lautsprecher-System entwickelt. Dabei handelt es sich um ein kugelförmiges Gehäuse mit 12 abgeflachten Seiten, mit jeweils einem Lautsprecher und unterstützt von einem Subwoofer.⁶⁸ Für einen Low-Budget-Einsatz ist diese Lösung allerdings zu teuer und es ist auch fraglich, ob eine kugelförmige Anregung unbedingt nötig ist, da es sich bei Instrumenten und Sprache/Gesang um gerichtete Schallquellen handelt.

⁶⁸ vgl. Farina/Ayalon o.J., S. 3

Audio Ease schlägt als portables Wiedergabesystem ein Autoradio mit CD-Player und einen passiven Studiolausprecher vor, welche mit einer Autobatterie betrieben werden. Aber auch tragbare Radio-CD-Player-Kombinationen, umgangssprachlich Ghetto-Blaster oder Boombox genannt, werden als brauchbar beschrieben und für zwei Modelle werden bei Altiverb auch Dateien zur Korrektur der Übertragungsfunktion mitgeliefert.⁶⁹ Auf der Seite von Audio Ease findet man Hörbeispiele, die mit von unterschiedlichen Wiedergabesystemen erzeugten Impulsantworten verhallt sind. Darunter auch eine Starterpistole.⁷⁰

5.4. Mikrofonierung

Die Wahl der Mikrofone und die Aufstellung dieser hängt vom späteren Verwendungszweck der Impulsantwort ab und von Mono bis 5.1 ist alles möglich. Nimmt man z.B. für eine mögliche Nachsynchronisation des Dialoges Impulsantworten am Set auf, reicht es diese in Mono aufzunehmen, da im fertigen Film der Dialog in den meisten Fällen aus den Center-Lautsprechern kommt. Es sollte aber darauf geachtet werden, die selben Mikrofone wie beim Dreh zu verwenden. Bei der Erstellung von Impulsantworten von Konzerträumen gelten die selben Regeln wie für die Hauptmikrofone bei der Aufnahme von Konzerten. Ich denke mir aber, dass es in diesem Fall recht schwer ist die Klangqualität anhand eines so abstrakten Schallereignisses wie einem Sweep zu beurteilen und das für qualitativ gute Impulsantworten von Konzertsälen reichlich Erfahrung von der Aufnahme von Konzerten nötig ist.

Um z.B. ein künstliches Orchester realistischer klingen zu lassen, kann man mehrere Messdurchgänge mit unterschiedlichen Lautsprecherpositionen auf der Bühne machen. Bei der Mischung erhält dann jede Instrumentengruppe ihre eigene Impulsantwort und somit wird eine realistische Links-Rechts-Verteilung und Tiefenstaffelung erreicht.⁷¹

⁶⁹ vgl. <http://www.audioease.com/Pages/Altiverb/demos/Portable%20sweep%20gear.pdf>

⁷⁰ vgl. <http://www.audioease.com/Pages/Altiverb/demos/sweepgear/sweepgear.html>

⁷¹ vgl. <http://www.audioease.com/Pages/Altiverb/AltiverbStagepositions.html>

Sollte man für die Aufnahme nicht genügend Mikrofone zur Verfügung haben, kann man mehrere Messdurchgänge mit unterschiedlichen Mikrofonpositionen durchführen. Dies ist möglich, da es sich bei einem Sweep ja immer um exakt das gleiche Signal handelt und somit jedes Messergebnis gleich sein muss. Dies gilt allerdings nur für ein zeitinvariantes System oder wenn die Zeitinvarianz so klein ist, dass man sie ignorieren kann.



Abb. 6 Dodekaeder mit Subwoofer

5.5. Aufnahmesystem

Als Aufnahmesystem kommt eigentlich alles vom DAT-Recorder bis zum Computer mit Soundkarte/Audiointerface in Frage. Laut David Griesinger soll man sogar mit einem Kassettenrecorder Ergebnisse erzielen, die annähernd mit einem DAT-Recorder vergleichbar sind. Dafür sollte man aber eine eventuelle Dolby B-Rauschunterdrückung abschalten.⁷² Am besten ist sicherlich ein Laptop mit Audiointerface, da man somit vor Ort gleich die Impulsantworten überprüfen und ihn auch gleichzeitig als Zuspielder für den Sweep benutzen kann. Allerdings könnten die Lüftergeräusche problematisch werden.

5.6. Korrektur des Frequenzgangs

Je unlinearer der Frequenzgang des Wiedergabe- und Aufnahmesystems ist, desto wichtiger ist dessen Korrektur. Tut man dies nicht, klingt das verhallte Audiosignal nicht als ob es sich im Raum befinden würde, sondern über Lautsprecher im Raum abgespielt wurde. Da ein schalltoter Raum im Low-Budget-Bereich eher nicht zur Verfügung steht, muss man sich damit behelfen, die Messung in einem möglichst großen Raum und so weit entfernt von den Reflexionsflächen wie möglich durchzuführen. Ideal wäre es, die Messung draußen durchzuführen, da man dort quasi ein freies

⁷² vgl. Griesinger o.J., S. 6

Schallfeld vorfindet. Problematisch können dabei aber Störgeräusche und durch Wind verursachte Zeitinvarianzen sein. Zur Vereinfachung wird die Gesamt-Übertragungsfunktion von Wiedergabe- und Aufnahmesystem gemessen. Man sucht praktisch die Impulsantwort des Systems und somit empfiehlt sich die Verwendung eines Sweeps als Anregungssignal. Werden für die Messung Druckgradientenempfänger verwendet, muss auf den Nahbesprechungseffekt geachtet werden. Für Nieren liegt der kritische Abstand, also der Abstand ab dem es zu einer Pegelanhebung von 3 dB kommt, bei 70 cm für 33 Hz und bei 35 cm für 66 Hz.⁷³ Hat man nun den Sweep, kann man mit einem Equalizer den Frequenzgang korrigieren, als Preset speichern und dieses dann auf die Impulsantwort anwenden. In Logic gibt es dafür den Match EQ, der das Spektrum einer Audiodatei analysieren kann und dieses dann auf eine andere Audiodatei übertragen kann. Ähnliche Filter sollte es auch in anderen Audioprogrammen geben.



Abb. 7 Match EQ in Logic Pro

Dabei ist aber zu beachten, dass die Korrektur sich ebenfalls auf den in der Impulsantwort befindlichen Störschall auswirkt. Hebt man z.B. wegen einer zu geringen Anregung des Raumes zu tiefen

⁷³ vgl. <http://www.sengpielaudio.com/NahbesprechungseffektGoerne.pdf>

Frequenzen hin den Bassbereich an, so hebt man ebenfalls den tieffrequenten Störschall an. Wiedergabe- und Aufnahmesysteme die extreme Korrekturen benötigen, sollten also möglichst vermieden werden.

5.7. Messung

Bei der Messung ist darauf zu achten, Zeiten mit möglichst wenig Störgeräuschen zu wählen. Die Positionierung der Lautsprecher sollte bei Konzerträumen und ähnlichem der Position der Musiker auf der Bühne entsprechen und die Mikrofone sollten entsprechend dem gewünschten Hauptmikrofonverfahren aufgestellt werden. Es ist allerdings zu beachten, dass ein leerer Konzertsaal anders klingt als ein durch Publikum gefüllter. Abhilfe kann man schaffen, indem man schallabsorbierende Materialien auf den Publikumsplätzen verteilt, was aber recht teuer und aufwändig ist. Eine andere Möglichkeit könnte sein, die Messung kurz vor einem Konzert, wenn die Plätze mit Publikum besetzt sind, durchzuführen. Dabei ist aber die Mithilfe der Zuschauer erforderlich. Um Impulsantworten für die Verwendung in der Filmtone-Postproduktion zu erstellen, muss das Set sich im selben Zustand wie beim Dreh befinden, da Teammitglieder und Technik große Auswirkungen auf die Akustik des Raumes haben können. Bei der Messung von Hall- und Echogeräten ist darauf zu achten, dass der Mix-Regler auf 100% „Wet“ steht, damit kein Direktschall mit aufgenommen wird.

5.8. Dokumentation

Für die spätere Bearbeitung der Impulsantwort sollte man sich Fotos/Skizzen der Aufnahmesituation machen, in denen ersichtlich wird wie die Abstände zwischen Mikrofonen, Lautsprechern und schallreflektierenden Flächen sind. Es müssen auch Notizen über die Länge, Start-, Endfrequenz und ob es sich um einen linearen oder logarithmischen Sweep handelt gemacht werden. Am besten legt man den Messungen den verwendeten Sweep mit bei.

5.9. Bearbeitung der Impulsantwort

Nachdem nun die Messung entfaltet ist und die Impulsantwort vorliegt, sollte man diese als erstes normalisieren. Anschließend blendet man nach Abklingen des Nachhalls den Rauschteppich aus. Da trotz überlagertem Rauschen der Nachhall noch eine Weile zu hören ist, kann man Teile des diffusen Schalls von einem früheren Zeitpunkt an diese Stelle kopieren, höhenärmer filtern und im Pegel anpassen.⁷⁴ Um Mischungsverhältnisse von weniger als 100% Effektanteil und mehr als 0% Direktanteil zu ermöglichen, muss der Direktschall entfernt werden, da es sonst zu Kammfiltereffekten kommen würde. Um die Anfangszeitlücke zwischen Direktschall und ersten Reflexionen zu bewahren, sollte man den Direktschall nicht einfach wegschneiden, sondern bis zum Einsetzen der ersten Reflexionen durch Stille ersetzen. Da es vor allem bei kleinen Räumen schwierig sein kann, Direktschall und erste Reflexionen zu unterscheiden, kann man mit Hilfe der hoffentlich gemachten Fotos/Skizzen die ungefähre Laufzeit der ersten Reflexionen berechnen. Den Teil vor dem Direktschall kann man einfach wegschneiden und um Knackser zu verhindern den Anfang mit einem kurzem Fade einblenden. Nach der anschließenden Korrektur des Frequenzgangs ist die Impulsantwort nun fertig zur Verwendung

⁷⁴ vgl. Turnwald/Leckschat 2002, S.4

6. Sinn und Auswirkung von Faltungshall

Andreas Turnwald verglich Faltungshall mit dem Lexicon 480L und kam zu der subjektiven Erkenntnis, dass er bei der Mischung den Hallpegel vom Faltungshall höher fahren konnte bis es unangenehm war als beim Lexicon. Geräusche werden sanft eingebunden und es gibt kaum ein Aufblühen der Hallfahne, Stimmen regen den Raum zwar stärker an, beeinträchtigen aber nicht die Sprachverständlichkeit. Auch bei den von im durchgeführten Hörtests bevorzugten die meisten die mit Impulsantworten verhallten Versionen. Er räumt aber auch ein, dass es sich beim Lexicon 480L zwar um ein Standart in Tonstudios handelt, es aber schon recht alt ist und es Geräte mit verbesserten Algorithmen gibt.⁷⁵

In der Ton-Postproduktion beim Film könnte Faltungshall zum Teil Worldizing ersetzen. Nur zum Teil, da Impulsantworten nur einen Moment einfangen und somit statisch sind. Bewegte Lautsprecher oder Mikrofone wie es Walter Murch bei American Graffiti anwendete sind nicht möglich. Ein anderes Beispiel ist Richard King. Um für den Film Gattaca überzeugende elektrische Autos zu kreieren, befestigte er auf einem Autodach einen Lautsprecher und während dies verschiedene Fahrmanöver absolvierte, spielte er darüber verschiedene Geräusche, wie elektrische Motoren, Sägen und auch tierische und menschliche Schreie ab. Dies nahm er dann mit Mikrofonen auf und konnte somit eine natürliche akustische Perspektive erzeugen.⁷⁶

Laut Andreas Turnwald sind die Kosten für die Erstellung von Impulsantworten am Set und für die Einstellung herkömmlicher Hallgeräte im Studio etwa gleich. Wenn aber eine internationale Auswertung mit mehreren Synchronisationen geplant ist, können Impulsantworten in alle Mischstudios geschickt werden und somit

⁷⁵ vgl. Turnwald/Leckschat 2002, S.7ff.

⁷⁶ vgl. http://www.editorsguild.com/v2/magazine/Newsletter/MarApr04/marapr04_worldizing.html

eine Zeitersparnis und eine höhere Qualität der Synchronversionen erreicht werden.⁷⁷ Es ist aber zu beachten, dass für die Messung die selben Bedingungen herrschen müssen wie beim Dreh, da Teammitglieder und Geräte die Akustik beeinflussen. Das heißt aber auch, dass für die Messung die Arbeiten eingestellt werden müssen und das Team warten muss. Da der Ton am Set leider oft eine untergeordnete Rolle spielt, kann es problematisch werden diese durchzusetzen. Hilfreich dabei ist ein kompaktes Messsystem und ein erprobter Arbeitsablauf, um die Messung möglichst schnell durchzuführen. Sollten am Drehort nicht vermeidbare Störgeräusche (z.B. eine nahe gelegene Straße, Lüfter usw.) ein Rauschen in der Impulsantwort verursachen, kann diese durch Atmos verdeckt werden. Somit sind auch Impulsantworten mit einem Signal-Rauschabstand von weniger als 80 dB akzeptabel.⁷⁸

Sind bei einer Live-Aufnahme einer Band oder eines Orchesters auf den Raummikrofonen ungewollte Störgeräusche durch Publikum vorhanden, kann man mit den passenden Impulsantworten mit relativ wenig Aufwand die einzelnen Instrumente/Gesang mit den jeweils passenden Impulsantworten verhallen. Als Ergebnis erhält man eine Aufnahme, die von Störgeräuschen befreit ist und die nötige Tiefenstaffelung und Abbildung im Stereobild enthält. Voraussetzung ist allerdings, dass alle Instrumente/Gesang mit Stützmikrofonen und auf einzelnen Spuren aufgenommen wurden. Allerdings sind somit auch die Publikumsreaktionen kaum noch vorhanden.

Ein realistischer Hall ist aber auch nicht immer das angestrebte Ziel, wie man z.B. am Gated Reverb sehen kann. Für diese Zwecke ist bis jetzt ein algorithmisches Hallgerät die bessere Wahl, da man dort je nach Qualität des Gerätes so ziemlich alle Parameter, wie z.B. zeitlicher Verlauf von ersten Reflexionen und Nachhall, Raumgröße, Dämpfung usw., einstellen kann. Jedoch nehmen die Editiermöglichkeiten von Faltungshallgeräten immer mehr zu und ich denke

⁷⁷ vgl. Turnwald/Leckschat 2002, S.10

⁷⁸ vgl. Turnwald/Leckschat 2002, S.6

mir, dass in Zukunft immer mehr Geräte rauskommen, die beide Technologien verwenden. Für einen authentischen Hall mit wenig Aufwand gibt es dann eine Auswahl an Impulsantworten und für weitere Eingriffsmöglichkeiten werden dann Algorithmen zur Verfügung gestellt, die die Bearbeiten der Impulsantworten ermöglichen. Dieser Trend ist z.B. schon bei Altiverb von Audio Ease und Waves IR-Serie zu sehen. Letzteres analysiert die Impulsantwort und erkennt Direktschall, erste Reflexionen und Diffusschall, welche sich dann in Lautstärke und/oder den zeitlichen Verlauf bearbeiten lassen. Es sind aber noch weitere Eingriffe möglich.⁷⁹

⁷⁹ vgl. <http://www.waves.com/Manuals/Plugins/IR-1.pdf>

7. Praxis

7.1. Technik

Für die Erzeugung des Sweeps und die Aufnahme der Impulsantwort kam die Software Impulse Response Utility zum Einsatz, welche in Logic Studio 9 von Apple enthalten ist. Sie lief auf einem Laptop Macbook Pro an dem als Audiointerface eine Mbox 2 angeschlossen wurde. Als Lautsprecher für die Wiedergabe des Sweeps benutzte ich einen Diamond 8.2 Pro Active der Firma Wharfedale, einen aktiven Studiomonitor. Für die mobile Messung kam ein JVC Micro Component System zum Einsatz, welches über einen Spannungswandler mit einer Autobatterie betrieben wurde. Für die Erzeugung eines dirac-ähnlichen Impulses verwendete ich Luftballons und als Mikrofone nahm ich Rode NT5. Alle klangbeeinflussenden Einstellungen wurden aus oder auf neutral geschaltet.

Die nachfolgenden Versuche sind auf der beiliegenden CD als Hörbeispiele enthalten.

7.2. Vergleich Realität und Impulsantwort

Um zu hören, wie nah ein mit einer Impulsantwort verhalttes Audiosignal an die Realität rankommt, spielte ich mit dem Plug-In EVP88 in Logic Pro ein kurzes Stück ein (Hörbeispiel 1). Es handelt sich dabei um eine auf Physical Modelling basierende Simulation eines Fender Rhodes und es ist somit möglich, Audiosignale ohne Raumanteil zu erzeugen. Dieses Stück spielte ich dann über einen Gitarrenverstärker in meinem Wohnzimmer ab und nahm einmal den Amp im Close-Miking-Verfahren ab und stellte in etwa zwei Meter Entfernung noch ein Mikrofonpaar in Äquivalenzstereofonie als Raummikrofone auf. Anschließend maß ich den Gitarrenverstärker und den Raum jeweils mit einem Sweep, wobei ich für die Messung des Raumes den Gitarrenverstärker mit dem Wharfedale austauschte. In Hörbeispiel 2 ist das EVP88 abgespielt über den Gitarrenverstärker zu hören und in Hörbeispiel 3 das EVP88 gefaltet mit einer Impulsantwort des Gitarrenverstärkers. In Hörbeispiel 4 sind

die Raummikros zugemischt und in Hörbeispiel 5 die Impulsantwort des Raumes.

7.3. Mobiles System

Um das mobile System zu testen, erstellte ich eine Impulsantwort vom VW Transporter meines Vaters. Das Problem dabei war, dass der verwendete Spannungswandler, der für die Stromversorgung des JVC Micro Component System über die Autobatterie verantwortlich war, einen Lüfter besitzt. Hörbeispiel 6 ist eine kurze Atmo des Transporters, in dem der Lüfter und auch die nahe gelegene Straße zu hören ist.



Abb. 8 JVC Micro Component System

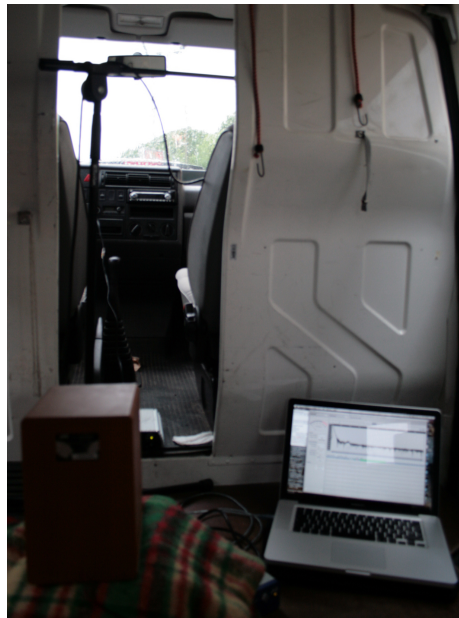


Abb. 9 Messung der Impulsantwort vom VW Transporter

Hörbeispiel 7 ist ein kurzer Dialog ohne jede Bearbeitung, der für die Faltung mit den im VW Transporter erstellten Impulsantworten verwendet wurde, was in Hörbeispiel 8 zu hören ist. Der Fahrer wurde dabei mit einer Impulsantwort gefaltet, bei der die Position des Mikrofons während der Messung im Cockpit und die des Lautsprechers im Laderaum war. Die Positionen von Mikrophon und Lautsprecher der Impulsantwort des Wegbeschreibers waren genau anders herum. Fahrer und Beifahrer habe ich noch etwas im

Panorama verteilt. In Hörbeispiel 9 habe ich noch ein paar Geräusche und Atmos hinzugefügt.

7.4. Vergleich von Sweep und Impuls durch Luftballon

Wie weiter oben schon erläutert, ist die qualitativ beste Lösung für die Messung von Impulsantworten die Anregung mit einem Sweep. In einigen Situationen ist dies aber nicht möglich und es bleibt nur die Anregung mit einem dirac-ähnlichem Impuls. Um einen qualitativen Vergleich der beiden Methoden durchzuführen, habe ich mein Badezimmer mit einem Sweep und mit einem platzenden Luftballon gemessen und zwar einmal ohne Störgeräusche und einmal mit absichtlich erzeugten Störgeräuschen in Form eines laufenden Wasserhahnes. Hörbeispiel 10 ist mit einer durch Sweep erzeugten Impulsantwort gefaltet, bei Hörbeispiel 11 wurde die Impulsantwort mit einem Luftballon erzeugt. Analog dazu sind in den Hörbeispielen 13 und 14 die Impulsantworten während dem tropfendem Wasserhahn erzeugt worden, welcher in der Atmo vom Bad (Hörbeispiel 12) zu hören ist. Hörbeispiel 15 ist nochmals mit der mit dem Luftballon erzeugten Impulsantwort gefaltet, nur diesmal noch mit einer groben Frequenzgangkorrektur.

7.5. Klangcharakteristik von Geräten einfangen

Durch die Faltung lässt sich nicht nur die Akustik eines Raumes einfangen, sondern auch die Klangcharakteristiken von Lautsprechern. Um dies zu testen, platzierte ich ein Telefon vor einen Lautsprecher und eins vor ein Mikrofon und spielte dann einen Sweep ab, der vom Mikrofon vor dem anderen Telefon wieder aufgenommen wurde. Hörbeispiel 16 enthält ein kurzes Telefongespräch ohne Bearbeitung, welches in Hörbeispiel 17 mit der Impulsantwort des Telefons gefaltet wurde. Da durch Faltung keine Verzerrungen eingefangen werden können, habe ich in Hörbeispiel 18 diese durch ein Plug-In hinzugefügt, was z.B. bei der Faltung mit Impulsantworten von Funkgeräten das Ergebnis realistischer klingen lässt.

7.6. Auswertung

Den einzigen Unterschied den ich im Vergleich von Realität und Impulsantwort hören konnte, war das nicht vorhandene Rauschen des Gitarrenverstärkers bei den gefalteten Versionen. Auch den Testpersonen, denen ich die Beispiele vorspielte, fiel nur das Nichtvorhandensein der Störgeräusche auf. Der Versuch mit dem mobilen System zeigt, dass man auch mit einfachen Mitteln, die alles andere als professionell sind, recht gute Ergebnisse erzielen kann, die sicherlich noch verbessert werden können, wenn man den Frequenzgang des Wiedergabesystems korrigiert. Erstaunlich finde ich das Ergebnis im Hinblick auf die bei der Messung der Impulsantwort vorhandenen Störgeräusche. Beim Vergleich von mit Sweep und Luftballon erzeugten Impulsantworten, ist ein deutlicher Unterschied zu hören. Bei der mit Luftballon erzeugten Impulsantwort machen sich die fehlenden Tiefen und Höhen deutlich bemerkbar und das Ergebnis klingt deutlich dumpfer als die Faltung mit der durch Sweep erzeugten Impulsantwort. Allerdings ist bei der Version mit dem Sweep die Klangcharakteristik des Lautsprechers zu hören. Am besten klingt meiner Meinung nach die Version mit dem korrigierten Impuls vom Luftballon. Wenn man allerdings noch die Impulsantwort des Sweeps korrigiert, sollte dieser eigentlich in der Qualität wieder vorne liegen. Wie im ersten Versuch schon bemerkt, ist die Messmethode mit Sweep recht unanfällig gegenüber Störgeräuschen. Aber auch die mit Luftballon erzeugten Impulsantworten unterscheiden sich nur minimal. Ob die Unterschiede jetzt aber durch den tropfenden Wasserhahn oder durch die nicht gleichen Anregungssignale der beiden Luftballons erzeugt werden, kann ich nicht beurteilen. Das qualitativ gute abschneiden der Luftballons dürfte daran liegen, dass es sich bei einem Badezimmer um einen kleinen Raum mit schallharten Wänden handelt, in dem der Knall eines Luftballons einen ausreichenden Signal-Rauschabstand erzeugen kann, selbst wenn man die fehlenden Tiefen und Höhen im Nachhinein mit einem Equalizer anhebt. Bei größeren Räumen sollte aber die Messmethode mit einem Sweep wieder deutlich vorne liegen. Der vierte Versuch zeigt, dass man mit Faltung auch die Klangcharakteristik von Lautsprechern einfangen kann. Legt man

sich eine Bibliothek von verschiedenen Telefonen, Lautsprechern usw. an, kann man z.B. in der Filmtone-Postproduktion sehr leicht und schnell verschiedene Alternativen durchhören. Es zeigt aber auch die Grenzen der Faltung, da z.B. Verzerrungen nicht mit eingefangen werden können. Beim letzten Punkt handelt es sich aber einmal um einen Nachteil und einmal um einen Vorteil. Bei der Messung von z.B. Räumen spiegeln sich somit durch das Wiedergabesystem erzeugte Verzerrungen oder durch im Raum befindliche Gegenstände erzeugte Resonanzen nicht oder nur minimal in der Impulsantwort wieder, was erwünscht ist. Wenn man aber die Klangcharakteristik von z.B. Funkgeräten einfangen möchte, an der Verzerrungen einen großen Anteil haben, wird man mit Faltung allein kein 100%ig realistisches Ergebnis erzielen. Dieses Manko lässt sich aber leicht beheben, indem man die fehlenden Verzerrungen mit entsprechenden Plug-Ins im Nachhinein hinzufügt.

8. Sonstige Anwendungen für Faltungshall

Neben dem Verhalten von Audiomaterial mit Impulsantworten von realen Räumen, gibt es noch andere Anwendungsmöglichkeiten für Faltungshall, auf die ich nachfolgend eingehen werde.

8.1. Auralisation

Um die akustischen Eigenschaften bei der Planung von Gebäuden vorherzusagen, wurden Anfang der 50er Jahre Modelle gebaut, was einen hohen zeitlichen und finanziellen Aufwand bedeutete. Mit der Einführung der Auralisation Ende der 60er Jahre, wurde ein Verfahren entwickelt, was die Planung wesentlich vereinfachte.⁸⁰ Durch die Simulation der Schallausbreitung durch Spiegel-schallquellen und Raytracing kann die Akustik von virtuellen Räumen hörbar gemacht werden.⁸¹ Somit kann recht schnell überprüft werden, wie sich verschiedene Maßnahmen auf die Akustik und/oder Schalldämmung eines Raumes auswirken und es ist auch möglich dem Kunden vorzuführen wie der Raum klingen wird. Eine andere Anwendungsmöglichkeit ist die Konservierung der Akustik von bestehenden Räumen um bei einer möglichen Restauration oder Wiederherstellung eine Referenz zu haben. Beispielsweise brannte das Gran Teatro La Fenice in Venedig ab, nur zwei Monate nach dem mehrere akustische Messungen durchgeführt wurden. Beim Wiederaufbau wurden diese Messungen benutzt, um die originale Akustik so gut wie möglich wiederherzustellen.⁸²

8.2. Sound Design

Für Sound Designer hält Faltungshall eine Menge an Möglichkeiten bereit. Durch das Sampeln von Telefonen, Funkgeräten, Lautsprechern, Amps, Megaphonen usw. kann man sich eine Bibliothek anlegen und wenn z.B. in einem Film ein Dialog über

⁸⁰ vgl. <http://de.wikipedia.org/wiki/Auralisation>

⁸¹ vgl. Weinzierl 2008, S. 679

⁸² vgl. Farina/ Ayalon o.J., S. 1

Telefon stattfindet und der charakteristische Klang benötigt wird, wendet man einfach die passende Impulsantwort an. Dabei ist aber zu beachten, dass Verzerrungen, wie sie bei z.B. Megaphonen oder auch Bahnhofslautsprechern auftreten, durch Faltung nicht reproduziert werden. Um in diesen Fällen einen authentischen Klang zu erhalten, muss man anschließend noch ein Verzerrungseffekt einfügen. Die Firma Audio Ease hat genau für diese Fälle das Plug-In Speaker Phone entwickelt, welches eine riesige Auswahl an Impulsantworten von Telefonen, Lautsprechern, Verstärkern, und Räumen enthält.⁸³ Man kann allerdings auch völlig ungewohnte Räume wie Flaschen, Waschmaschinen, Schläuche und vieles mehr sampeln.



Abb. 10 Messung der Impulsantwort einer Plastikflasche (Hörbeispiel 19)

Verwendet man anstatt eines Impulses ein beliebiges Audiosignal, entstehen dabei vocoderartige Effekte. Wenn man auf einer Spur einen Faltungshall insertiert hat und am Eingang ein Mikrofon oder Instrument anschließt, kann man den Faltungshall live steuern. Dabei kann es aber schnell zu verwaschenen Ergebnissen kommen. Bei meinen bisherigen Versuchen hat sich bis jetzt herausgestellt, dass die besten Ergebnisse zustande kommen, wenn man kurze

⁸³ vgl. <http://www.audioease.com/Pages/Speakerphone/speakerphone.html>

Audiosignale mit langen Ersatzimpulsantworten faltet. Interessant kann es auch sein, ein Audiosignal mit sich selber zu falten. In Hörbeispiel 20 ist das Wort Hallo zu hören, welches in Hörbeispiel 21 mit sich selber gefaltet wurde und in Hörbeispiel 22 wurde es mit seiner rückwärts abgespielten Version gefaltet.

8.3. Simulation von Effektgeräten

Wie weiter oben schon bemerkt, kann man mit Faltungshall nicht nur reale Räume sampeln. Man kann beispielsweise die meistbenutzten Settings seiner Hardwarehall- und -echogeräte sampeln und diese dann mehrfach einsetzen, ohne erst eine Spur mit dem Effekt aufnehmen zu müssen, was je nach Länge eine Menge Zeit dauern würde und bei jeder Änderung wiederholt werden müsste. Dabei können je nach verwendetem Faltungshall-Plug-In noch Parameter wie z.B. Predelay, Halllänge und mehr geändert werden. Auch ist es möglich, teure und seltene Effektgeräte zu sampeln und somit auch als Normalsterblicher in deren Genuss zu kommen. Im Internet findet man sogar kostenlose Impulsantworten von Kultgeräten und weiter hinten habe ich eine Auswahl von Internetadressen wo man diese runterladen kann. Allerdings ist zu bedenken, dass z.B. Lexicon in einigen Geräten Algorithmen verwendet, die den Hall durch Modulationen zufällig erzeugen (random hall algorithm). Somit sind sie nicht zeitinvariant und die Impulsantwort wird statischer klingen als das Original.⁸⁴

Neben Hall- und Echogeräten kann man auch die Klangcharakteristik von andern Geräten, wie z.B. Mikrofonen, Channelstrips, Equalizern und begrenzt auch von Kompressoren, Gitarrenverstärkern und ähnlichem, sampeln. Viele analoge Geräte prägen dem Audiosignal nämlich aufgrund der Wandler, Röhren usw. einen eigenen Sound auf, auch wenn sie nur durchgeschliffen werden. Antares und Roland haben beide mit dem Microphone Modeler⁸⁵ beziehungsweise

⁸⁴ vgl. Weinzierl 2008, S. 754

⁸⁵ vgl. <http://www.antarestech.com/products/amm.shtml>

COSM Microphone Modeling⁸⁶ Lösungen entwickelt, mit denen man ein bei der Aufnahme verwendetes Mikrofon klangmäßig in ein anderes umwandeln kann. Dafür wird eine Bibliothek mit Impulsantworten von Mikrofonen geliefert. Nun wählt man aus, mit welchem Mikrofon die Aufnahme gemacht wurde und nach welchen Mikrofon es klingen soll. Wenn vom Ursprungsmikrofon eine Impulsantwort existiert, wird durch Entfaltung dessen Klangcharakteristik entfernt und anschließend die des gewünschten aufgefaltet. Inwieweit die Qualität überzeugen kann, kann ich nicht sagen, da ich keines der beiden Lösungen testen konnte. Es darf jedoch bezweifelt werden, dass z.B. aus einem SM58 einfach so ein U87 wird. Dynamikbearbeitende Effekte wie Kompressoren lassen sich mit der herkömmlichen Faltung nicht wirklich sampeln, da mit sich änderndem Eingangspegel das Signale unterschiedlich bearbeitet wird und somit keine Linearität gegeben ist. Dies gilt auch für alle möglichen Geräte die mit Röhren funktionieren. Beispielsweise entsteht der warme Sound eines Röhrenmikrofonvorverstärkers dadurch, dass Verzerrungen harmonische Obertöne produzieren und diese für den warmen Klang verantwortlich sind. Um diese Geräte sampeln zu können, wurde die Dynamic Convolution entwickelt, auf die ich nachfolgend weiter eingehen werde.

8.3.1. Nicht-Lineare Systeme

Die Firma Sintefex entwickelte Ende der 90er Jahre ein Verfahren, um nicht-lineare Systeme zu simulieren. Dieses Verfahren wird Dynamic Convolution genannt und beruht darauf, dass das System mit mehreren Impulsen gemessen wird, die unterschiedliche Pegel besitzen. Dabei wird das gewünschte Gerät mit 128 Impulsen gemessen, die im Pegel linear von Volllaussteuerung bis 40 dB darunter verteilt sind, da ab diesem Wert die meisten Geräte linear arbeiten.⁸⁷ Diese Messung muss mit allen möglichen Einstellungen des Gerätes durchgeführt werden. Anschließend wird jedes Sample des zu bearbeitenden Audiosignals mit der in der Lautstärke

⁸⁶ vgl. http://www.crmav.com/35/akg_microphones_are_reference.shtml

⁸⁷ vgl. <http://www.sintefex.com/docs/appnotes/dynaconv.PDF>

entsprechenden Impulsantwort gefaltet. Focusrites Liquid-Serie beruht z.B. auf diesem Verfahren.⁸⁸

⁸⁸ vgl. http://www.focusrite.com/de/products/liquid/the_liquid_channel

9. Fazit

Die Ergebnisse, die durch faltungsgenerierten Hall entstehen, können durchaus überzeugen. Dabei ist die Qualität des Halls von der verwendeten Impulsantwort abhängig, aber wie durch die praktischen Versuche bemerkt, lassen sich teilweise sogar mit einer durch einen Luftballon erzeugten Impulsantwort überzeugende Ergebnisse erzielen. Neben der Simulation der Akustik von Räumen ist aber auch die Verwendung im Sound Design interessant. Allerdings sind die zu erzielenden Ergebnisse noch etwas unvorhersehbar, was sich aber sicher mit mehr Erfahrung ändert. Ich bin auch davon überzeugt, dass sich die algorithmische und die faltungsgenerierte Hallerzeugung immer mehr vermischen werden. Diese Entwicklung spiegelt sich z.B. schon in den Plug-Ins Altiverb von Audio Ease und IR-1 von Waves wieder. Somit wird die Grundlage eine Impulsantwort sein, die dann mit verschiedenen Algorithmen bearbeitet werden kann.

10. Auswahl an Links zu kostenlosen Impulsantworten

Noisevault

www.noisevault.com

Echochamber

<http://www.memi.de/echochamber/responses/index.html>

Voxengo

<http://www.voxengo.com/impulses/>

Spirit Canyon Audio

<http://www.spiritcanyonaudio.com./kaleidoskopy.php>

Fokke van Saane

<http://www.xs4all.nl/~fokkie/IR.htm>

Lexicon PCM-90

<http://homepage.hispeed.ch/zidee/>

MoReVox

<http://www.morevox.com/>

Sony Acoustic Mirror

<http://www.sonycreativesoftware.com/download/impulses>

11. Quellenverzeichnis

M.Dickreiter, Handbuch der Tonstudiotechnik, Band 1, 6. verb. Auflage, K.G.Saur München, 1997

J.Meyer, Akustik und musikalische Aufführungspraxis, Auflage 5, Edition Bochinsky, 2004

M.Chion, Audio-Vision, Columbia University Press, 1994

T.Sandmann, Effekte & Dynamics, PPV Presse Projects Verlags GmbH, Bergkirchen, 2. Auflage 2001

D. Sonnenschein, Sound Design, Michael Wiese Productions, 2001

A.U. Case, Sound FX, 1st ed., Focal Press, 2007

S.Weinzierl, Handbuch der Audiotechnik, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008

S.Müller, P. Massarani, Transfer Function Measurement with Sweeps, JAES, 2001

A.Farina, R. Ayalon, Recording Concert Hall Acoustics For Posterity, o.J.

D.Griesinger, Beyond MLS - Occupied hall measurement with FFT techniques, o.J.

A.Turnwald, D. Leckschat, Aufnahme und Verwendung von Raumimpulsantworten zur Hallerzeugung für 5.1-Filmtone, Vortrag auf der Tonmeistertagung 2002

<http://www.sengpielaudio.com>
(Letzter Zugriff: 06.08.10)

http://www.youtube.com/watch?v=3_d9uwPj0t4
(Letzter Zugriff: 26.05.10)

<http://www2.yk.psu.edu/~jnj3/murchfq.htm>
(Letzter Zugriff: 30.05.10)

<http://www.accutronicsreverb.com>
(Letzter Zugriff: 30.05.10)

<http://mixonline.com>
(Letzter Zugriff: 13.07.10)

<http://www.freepatentsonline.com/2674660.pdf>
(Letzter Zugriff: 13.07.10)

http://www.acoustics.net/objects/pdf/review_aes_gerzon01.pdf
(Letzter Zugriff: 13.07.10)

<http://www.sheffield.ac.uk/content/1/c6/01/79/48/HuronMan32.pdf>
(Letzter Zugriff: 14.07.10)

<http://www.dspguide.com>
(Letzter Zugriff: 25.07.10)

<http://www.audioease.com>
(Letzter Zugriff: 24.08.10)

http://www.editorsguild.com/v2/magazine/Newsletter/MarApr04/marapr04_worldizing.html
(Letzter Zugriff: 21.08.10)

<http://www.waves.com/Manuals/Plugins/IR-1.pdf>
(Letzter Zugriff: 21.08.10)

<http://de.wikipedia.org/wiki/Auralisation>
(Letzter Zugriff: 23.08.10)

<http://www.antarestech.com/products/amm.shtml>
(Letzter Zugriff: 24.08.10)

http://www.crmav.com/35/akg_microphones_are_reference.shtml
(Letzter Zugriff: 24.08.10)

<http://www.sintefex.com/docs/appnotes/dynaconv.PDF>
(Letzter Zugriff: 25.08.10)

http://www.focusrite.com/de/products/liquid/the_liquid_channel
(Letzter Zugriff: 25.08.10)

12. Abbildungsverzeichnis

Alle Grafiken und Bilder wurden von mir selber erstellt, außer:

Abb. 2: <http://recforums.prosoundweb.com/index.php/fa/7829/0/>
(Letzter Zugriff: 30.05.10)

Abb. 3: http://das.blogsport.de/images/EMTsmall_01.jpg
(Letzter Zugriff: 13.07.10)

Abb. 4: <http://mixonline.com/TECnology-Hall-of-Fame/1976-EMT-reverb/index.html>
(Letzter Zugriff: 13.07.10)

Abb. 5: S. Weinzierl, Handbuch der Audiotechnik, Springer-Verlag
Berlin Heidelberg, 2008, S. 792

Abb. 6: Farina, R. Ayalon, Recording Concert Hall Acoustics For
Posterity, o.J., S. 3

13. Inhalt der CD

Track 01: EVP88

Track 02: EVP88 über Fender Deluxe

Track 03: EVP88 mit Impulsantwort von Fender Deluxe gefaltet

Track 04: EVP88 über Fender Deluxe und Raummikros

Track 05: EVP88 mit Impulsantwort von Fender Deluxe und Raum
gefaltet

Track 06: Transporter - Atmo mit Lüfter

Track 07: Transporter - Dialog ohne Bearbeitung

Track 08: Transporter - Dialog mit Impulsantwort gefaltet

Track 09: Transporter - Dialog mit Impulsantwort gefaltet + Atmo/FX

Track 10: Bad - Sprache mit durch Sweep erzeugte Impulsantwort
gefaltet

Track 11: Bad - Sprache mit durch Luftballon erzeugte Impulsantwort
gefaltet

Track 12: Bad - Atmo

Track 13: Bad - Sprache mit durch Sweep erzeugte Impulsantwort
gefaltet (tropfender Wasserhahn bei Messung)

Track 14: Bad - Sprache mit durch Luftballon erzeugte Impulsantwort
gefaltet (tropfender Wasserhahn bei Messung)

Track 15: Bad - Sprache mit durch Luftballon erzeugte, korrigierte
Impulsantwort gefaltet

Track 16: Telefongespräch ohne Bearbeitung

Track 17: Telefongespräch mit Impulsantwort gefaltet

Track 18: Telefongespräch mit Impulsantwort gefaltet + Verzerrung

Track 19: Plastikflasche

Track 20: Hallo

Track 21: Hallo mit sich selbst gefaltet

Track 22: Hallo mit sich selbst gefaltet (rückwärts)

14. Selbstständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe als angegeben. Auch wurde diese Arbeit noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke verwendet.

Berlin, den 31.08.10